T. L. Dambe

1971

Aus der CHIRURGISCHEN Klinik der Universität
des Saarlandes
Direktor: Prof. Dr. med. H. Lüdeke

Revaskularisation der Diaphyse langer Röhrenknochen nach Fraktur und Osteosynthese

I N A U G U R A L D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung der Doktorwürde der
HOHEN MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
DER UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

vorgelegt von
Tresfore Leo Dambe

Dekan: Prof. Dr. med. H. Kulenkampff
Referent: Priv. Doz. Dr. med. L. Schweiberer

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Promotionsdatum 29.6. 1971.

Gliederung

Seite

A) Einleitung 1

B) Schrifttum

I. Die physiologische Blutversorgung in der Tibia 3

II. Die Wirkung selektiver Unterbindung arterieller Systeme des Röhrenknochens .. 7

III. Die Wirkung chirurgischer Eingriffe auf das Knochenmark der Diaphyse 12

C) Eigene Experimente

Untersuchungsmethoden 15

I. Physiologische Blutversorgung der Tibia des Hundes (1. Versuchsserie). 2o

II. Die Knochenbruchheilung der Diaphyse des Röhrenknochens unter Ruhigstellung durch Gipsverband (2. Versuchsserie) 26

III. Die Knochenbruchheilung der Diaphyse des Röhrenknochens nach geschlossener und offener Marknagelung (3. Versuchsserie) 38

IV. Die Knochenbruchheilung der Diaphyse des Röhrenknochens nach offener Marknagelung (4. Versuchsserie)..... 49

V. Die Knochenbruchheilung der Diaphyse des Röhrenknochens nach Druckplatten-Osteosynthese (5. Versuchsserie) 53

D) Diskussion und Schlußfolgerung 62

E) Zusammenfassung 69

F) Literaturverzeichnis 71

Danksagung

Lebenslauf

REVASKULARISATION DER DIAPHYSE LANGER RÖHRENKNOCHEN NACH FRAKTUR UND OSTEOSYNTHESE.

(Eine Angio- und Mikroangiographische Studie an der Tibia des Hundes).

A) Einleitung:

Die Behandlung von Frakturen der Diaphyse langer Röhrenknochen hat in den letzten Jahrzehnten große Verbesserungen erfahren. Küntscher entwickelte seit 194o die Marknagelung zur technischen Perfektion (Küntscher 194o und 1962). In der Schweiz hat eine Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen die Methoden der interfragmentären Druckosteosynthesen von Danis (1949) aufgegriffen und in Zusammenarbeit von Chirurgen, Orthopäden, Anatomen, Physiologen und Metallurgen die Zugschrauben-, Druckplatten- und Zuggurtungsosteosynthese als wertvolle Verfahren der Knochenbruchbehandlung wissenschaftlich begründet und praktisch erprobt, (Wagner 1962, Weiser und Allgöwer 1962, Willenegger und Mitarbeiter 1962, Schenk und Willenegger 1963, Schenk und Willenegger 1964, Müller, Allgöwer und Willenegger 1965).

Die Literatur über Osteosynthese und reparatives Knochenwachstum unter stabiler Fixation von Frakturen ist sehr umfangreich geworden. Wenig Kenntnis besitzen wir dagegen über Revaskularisation des Knochens nach Fraktur und

Osteosynthese. Wir kennen zwar den Modus physiologischer Vaskularisation, nicht geklärt dagegen ist, ob das verletzte oder gar zerstörte Gefäßsystem des Knochens aus den medullären oder aus den periostalen Gefäßen sich wieder aufbaut und ob die beiden Gefäßsysteme - medulläres und periostales - einander ersetzen können. Diesen und ähnlichen Fragen wendet sich vorliegende experimentelle Arbeit zu.

Als Versuchstiere wurden ausgewachsene Hunde verwandt. Die Versuche wurden so gewählt, daß die wichtigsten Methoden der Frakturbehandlung repräsentiert werden. Gewählt wurden: Gips, Druckplattenosteosynthese, geschlossene und offene Marknagelung. Insgesamt wurden 52 Tiere zu den Experimenten herangezogen. 9 Hunde starben vor Beendigung der Experimente an Allgemeininfektionen. Bei einem Hund entwickelte sich eine Osteomyelitis, bei einem Tier brach die Platte, ein mit Gips behandeltes Tier entwickelte eine Pseudoarthrose, so daß diese Versuche in die Auswertung nicht miteinbezogen werden konnten.

B) S c h r i f t t u m :

Lexer und seine Schule veröffentlichten schon 1904 eine Arbeit über die arterielle Blutversorgung in den Röhrenknochen. Diese Arbeit bildete die Grundlage weiterer Untersuchungen über die Blutversorgung des Röhrenknochens. Der Verlauf größerer Gefäße des Knochens ist seit langem bekannt. Die Mikrozirkulation des Markraumes, der Kortikalis und des Periostes und ihre prinzipielle Bedeutung für die Gesamtversorgung des Knochens ist jedoch noch Gegenstand wissenschaftlicher Diskussion und unterschiedlicher Interpretation.

I. Die physiologische Blutversorgung in der Tibia

Die Diaphyse eines Röhrenknochens wird von der A. nutritia und metaphysären und periostalen Arterien mit Blut versorgt. Die A. nutritia der Tibia des Kaninchens stammt aus der A. tibialis anterior (Brookes und Harrison 1957, Göthmann 1961). Sie läuft schräg durch die Kortikalis distalmedialwärts und tritt in das Knochenmark ohne Verästelung ein (Brookes 1964). Erst hier verzweigt sie sich in ascendierende und descendierende Äste, die ihrerseits mit den metaphysären Gefäßen anastomosieren (Göthmann 1961). Die A. nutritia und ihre Äste versorgen das Knochenmark mit Blut. Aus dem Knochenmark treten drei verschiedene Arteriolensysteme in die Kortikalis ein. Ein Arteriolensystem dringt in die Kortikalis ein, um dort mit den Gefäßen der Haver'schen Kanäle zu anastomosieren (Göthmann 1961). Eine andere Gruppe penetriert in den inneren Teil

der Kortikalis und kehrt dann in die venösen Systeme des Knochenmarks zurück (Röhlich 1941, Bränemark 1959). Die dritte Gruppe durchdringt die ganze Kortikalis und anastomosiert mit den periostalen Gefäßen (Brookes und Harrison 1957, Göthmann 1961). Bei fast allen untersuchten Kaninchen fand man eine zweite A. nutritia, die manchmal rudimentär war (Göthmann 1961). Diese zusätzliche A. nutritia durchbohrt die Tibia von der tibio-fibularen Synarthrose-Seite ventro-distalwärts und versorgt das distal-laterale Gebiet des Knochenmarks. Manchmal gibt es keinen descendierenden Ast der A. nutritia. In solchen Fällen wird das ganze Knochenmark distal der Synarthrose durch die zweite A. nutritia versorgt.

Die metaphysären Arterien kommen aus dem periostalen Plexus der Metaphyse. Sie dringen mit ziemlich dicken Gefäßen an verschiedenen Stellen in die Kortikalis ein. In der Metaphyse anastomosieren sie mit den Arterien aus der A. nutritia (Brookes und Harrison 1957, Göthmann 1961, Trueta und Cavadias 1964). Eine Epiphyse im wachsenden Knochen hat ihre eigene Blutversorgung. Erst nach dem Abschluß des Epiphysenwachstums anastomosieren die epiphysären und metaphysären Arterien (Trueta und Cavadias 1964). Göthmann (1961) beobachtete, daß die Anastomosen in der distalen Epiphyse stärker sind als die in der proximalen Epiphyse. Das periostale arterielle System der Diaphyse besteht aus sechs bis sieben längs zur Tibia verlaufenden Arterien. Die Gefäße

laufen entlang der ganzen Diaphyse und haben Verbindung zu dem periostalen Plexus an den beiden Metaphysen (Morgan 1959). Eine größere Anzahl kleinkalibriger Arterien stammt aus den umliegenden Muskelarterien und trifft auf das periostale Gefäßsystem. Es bestehen vereinzelt Anastomosen zu den Havers'schen Kanalgefäßen und zu den Knochenmarkarterien. Die vom Periost in die Kortikalis eindringenden Gefäße liegen gehäuft im metaphysären Bereich (Morgan 1959, Göthmann 1961, Trueta 1965).

Die Gefäße der diaphysären Kortikalis liegen in Kanälchen, deren Durchmesser 1o bis 2o µ beträgt (Bränemark 1959). Nach den Beobachtungen von Brookes (1964) laufen die Knochenkanälchen in den perichondral wachsenden Knochen bei jungen Kaninchen in Richtung des primären Verknöcherungskerns des Schaftes. In dem enchondral wachsenden Knochen verlaufen die Knochenkanälchen hauptsächlich longitudinal. Die Kanälchen haben zahlreiche Verbindungen unter sich. In dem inneren Teil der Kortikalis sind die Kanälchen dicker als in den periostalen Randgebieten (Cohen und Harris 1958). Die Kanälchen enthalten Gefäße nur aus Endothelzellen. Der Durchmesser ist stets konstant, auch nach wiederholter Verästelung und Anastomosierung. Nach den Beobachtungen von Bränemark (1959) beträgt der Durchmesser der Kapillaren 7 bis 8 . Er fand in einer vitalen mikroskopischen Studie des endostalen Teils der Kortikalis der Kaninchen-Fibula in einigen Kanälchen

zwei Gefäße mit unterschiedlicher Ströumgsgeschwindigkeit und in entgegengesetzter Richtung. Trueta (1963) beobachtete in einer mikroskopischen Ultraviolettstudie nach Einspritzen von Kontrastmittel im subperiostalen Knochen des Kaninchens intracorticale Kanälchen mit Arteriolen und Venen.

Es bestehen Meinungsverschiedenheiten unter den Autoren, welches der obengenannten Gefäßsysteme die einzelnen Abschnitte der diaphysären Kortikalis normalerweise versorgt. Histologische und angiographische (De Marneffe 1951, Brookes und Harrison 1957, Morgan 1959, Göthmann 1961, Trueta 1963, Trueta und Cavadias 1964) und vital-mikroskopische Untersuchungen (Bränemark 1959) befaßten sich mit diesem Problem. Nach Brookes ist die Blutversorgung der Kortikalis zentrifugal, d.h., das Blut fließt über die Aufzweigungen der A. nutritia vom Knochenmark in Richtung Periost. Die Strömungsrichtung kann sich aber auch ändern. Je nach Druckgradienz zwischen Knochenmarkgefäße und um den Knochen umliegende Gefäßsysteme soll das Blut aus der Kortikalis zentrifugal oder zentripetal fließen. Nach Röhlich (1941) münden die meisten Kortikalisvenen in die Sinusoide der Knochenmarkhöhle.

Die Gefäße im subperiostalen Teil der Kortikalis werden von Brookes (1961) ausschließlich als Venen angesehen. Dieser Meinung schließen sich auch Brookes und Harrison (1957),

Mc Auley (1958), Macnab (1958), Gustilo et. al. (1964) und Harrison (1966) an. Diese Autoren stützen sich auf mikroangiographische Versuche, bei denen $BaSO_4$ als Kontrastmittel benutzt wurde. Brookes und Harrison (1957) meinen aber, daß das $BaSO_4$ die Gefäße distal der Arteriolen nicht mehr füllt. Diese Tatsache bedeutet, daß die Kapillaren, die vom Periost in die Kortikalis eintreten, ohne Kontrastfüllung bleiben (Trueta 1963). Morgan (1959) und Trueta (1963) behaupten, daß das äußere Drittel der Kortikalis von den periostalen Gefäßen versorgt wird und die inneren Zweidrittel von den Ästen der A. nutritia. Rhinelander et. al. (1968) und Kelly (1968) schließen sich der Auffassung der obengenannten Autoren an. De Marneffe (1953) glaubt, daß die Kortikalis in dem proximalen Teil der Tibiadiaphyse des Kaninchens hauptsächlich von den Markgefäßen, der mittlere Teil periostalen und Knochenmarkgefäßen und der distale Teil ausschließlich von den periostalen Gefäßen mit Blut versorgt wird.

II. Die Wirkung selektiver Unterbindung arterieller Systeme des Röhrenknochens

1) Unterbindung der A. nutritia:

In diesem Versuch wurde die A. nutritia außerhalb des Knochens unterbunden. Zur Blutversorgung bleiben nur noch die periostalen und die metaphysären Arterien. Diese Versuche gehen auf Bragdon et. al. (1949) und Trueta und Cavadias (1964) zurück. Histologisch fanden Bragdon et. al.

im Knochenmark des Femur junger Kaninchen kleine Infarktflecken. In einigen Fällen fanden sie große Nekrosebezirke der Kortikalis. Trueta und Cavadias untersuchten den Radius junger und erwachsener Kaninchen histologisch und angiographisch. Sie sahen bei jungen und erwachsenen Kaninchen einen normalen Gefäßverlauf ohne Nekrosen in der Kortikalis. Cuthbertson et. al. (1964) berichten über einen Versuch, bei dem die Unterbindung der A. nutritia von Tibia und Humerus einen plötzlichen und starken Abfall des intramedullären Druckes verursachte. Der Druck blieb für ein bis drei Stunden, bei 9 von 19 Tieren, und 4 bis 22 Tage und mehr bei den übrigen Hunden niedrig.

2) Unterbindung der A. nutritia und des periostalen arteriellen Systems:

Zur Versorgung der Kortikalis und des Knochenmarks bleibt bei diesen Versuchen, die auf Foster et. al. (1951) und Trueta und Cavadias (1964)zurückgehen, nur noch das metaphysär-epiphysäre Gefäßsystem bestehen. Um die Revaskularisation zu vermeiden, wurde eine Plastikfolie um die Diaphyse gelegt. Foster et. al. fanden am Femur von jungen Kaninchen Totalnekrosen des Knochenmarks und der Kortikalis. Bei erwachsenen Tieren waren Knochenmark und Kortikalis normal mit Blut versorgt, es entstanden keine Nekrosen. Ähnliche Beobachtungen machten Trueta und Cavadias.

Johnson (1927), Larson et. al. (1961) und Silbermann et. al. (1967) machten ähnliche Versuche an Hunden. Larson et. al. sahen eine gute Füllung der Gefäße mit $BaSO_4$. Histologisch waren normale Zellen zu sehen. Silbermann et. al. sahen 7 Tage nach einer Operation fast einen totalen Ausfall der Gefäße in der Kortikalis bei der Angiographie mit $BaSO_4$ als Kontrastmittel. Auch nach längeren Zeitabständen waren noch Nekrosen im Knochenmark und in der Kortikalis zu sehen. Larson et. al. stellten keinen Schaden im Knochenmark oder in der Kortikalis während der ersten Tage nach Unterbindung des periostalen arteriellen Systems und Verschluß der A. nutritia bei erwachsenen Hunden fest. Nach längerer Dauer des Verschlusses fanden die Autoren jedoch einige Nekrosen im Knochenmark. Johnson berichtete von Nekrosen in den äußeren Zweidritteln der Kortikalis nach dauernder Unterbindung der obengenannten Gefäße.

3) Unterbindung des periostalen arteriellen Systems:
Bei diesen Versuchen bleibt die A. nutritia und die metaphysären Arterien zur Blutversorgung der Kortikalis erhalten. Trueta und Cavadias (1964) fanden partielle Nekrosen des äußeren Teils der Kortikalis. Das Knochenmark blieb unverändert.

4) Unterbindung des periostalen und metaphysären arteriellen Systems:

Bei diesen Versuchen ist nur die A. nutritia für die Blutversorgung der Diaphyse von Bedeutung. Um die Revaskularisation zu vermeiden wurden um die Diaphyse Plastikfolien gelegt, das metaphysäre Knochenmark ausgeräumt und mit Wachs ausgefüllt. Trueta und Cavadias (1964) sahen danach in der Tibia von jungen und erwachsenen Kaninchen angiographisch normale Gefäße im Knochenmark und in den inneren zwei Dritteln bis drei Vierteln der Kortikalis. Die Gefäße in den äußeren Dritteln bis ein Viertel der Kortikalis waren nicht mit $BaSO_4$ gefüllt und einige Bezirke dieses Kortikalisabschnittes zeigten Nekrosen. Auch Johnson (1927) beobachtete Nekrosen im äußeren Drittel der Kortikalis nach ähnlichen Versuchen. Die Knochenmarkgefäße waren normal. Shim et. al. (1968) fanden in ihren Versuchen der arteriellen Blutversorgung des Femurs junger Kaninchen mit Strontium ^{85}, daß die A. nutritia 71 % der Diaphyse und des Knochenmarks mit Blut versorgt.

5) Unterbindung der A. nutritia und des metaphysären arteriellen Systems:

Den Verlust der A. nutritia und der metaphysären Arterien durch die periostalen Arterien möglicherweise zu kompensieren, ist von besonderem praktischem Interesse bei der Marknagelung. Verschiedene Autoren berichten über unter-

schiedliche Ergebnisse. Die Diskrepanz ergibt sich jedoch wahrscheinlich aus der unterschiedlichen Versuchsanordnung. Trueta und Cavadias (1964) durchtrennten die A. nutritia außerhalb der Tibia bei jungen und ausgewachsenen Kaninchen, kratzten gleichzeitig das Knochenmark in der Metaphyse aus und ersetzten es durch Wachs. Danach kam es zu keiner Füllung der corticalen Gefäße; nach einer Woche waren die inneren zwei Drittel der Kortikalis nekrotisch. Nach einer angiographischen Studie mit $BaSO_4$ stellten Macnab (1958), Mc Auley (1958), Gustilo et. al. (1964) fest, daß die periostalen Arterien unfähig sind, die Blutversorgung der gesamten Kortikalis zu gewährleisten. Johnson (1927) fand nach ähnlichen Versuchen eine Total-Nekrose des Knochenmarks und der inneren Hälfte der Kortikalis. Die mit indischer Tinte angefertigten Angiogramme ließen keine Gefäße in der Kortikalis erkennen. De Marneffe (1951) behauptet, daß die periostalen Arterien im distalen Teil der Kaninchentibia die gesamte Kortikalis in diesem Bereich mit Blut versorgen können. Rhinelander und Baragry (1962) sind der Meinung, daß die periostalen Gefäße des Röhrenknochens die Blutversorgung der ganzen Kortikalis zu übernehmen vermögen, wenn die Knochenmarksdurchblutung ausfällt.

III. Die Wirkung chirurgischer Eingriffe auf das Knochenmark der Diaphyse

Chirurgische Eingriffe am Knochenmark können die Durchblutung des Markraumes und der Kortikalis auf verschiedene Weise stören. Göthmann (1961) beobachtete angiographisch nach Marknagelung der Kaninchentibia mit und ohne Fraktur Reste der A. nutritia. In den ersten Tagen nach der Operation waren die intrakortikalen Arterien mit $BaSO_4$ gefüllt. Die Osteocyten waren unauffällig. Trueta und Cavadias untersuchten Radiusfrakturen bei Kaninchen, die genagelt wurden. Sie fanden angiographisch ganz zerstörte Knochenmarkgefäße. Auch weit entfernt vom Frakturbereich waren Nekrosen in den inneren zwei Dritteln der Kortikalis histologisch nachweisbar. Rhinelander et. al. (1967) machten ähnliche Versuche an Hunden. Die inneren zwei Drittel der Kortikalis zeigten wenige Arterien. Gustilo et. al. (1964) benutzten den Femur von Hunden als Versuchsobjekt. Der innere Teil der Kortikalis erhielt kein Blut aus den periostalen Gefäßen. Bei Affen stellte Göthmann (1961) nach Marknagelung der osteotomierten Tibia fest, daß Markgefäße weniger zerstört waren als bei Kaninchen. Die intracorticalen Arterien waren aber in den ersten Wochen nach der Operation nicht mit Kontrastmittel gefüllt.

Röhlich (1941), Bränemark (1964) und Zucman et. al. (1968) haben das Knochenmark von Kaninchen total zerstört und

ausgeräumt. Richany et. al. (1965) haben das Experiment an Katzen und Mital und Cohen (1966) an Ratten unternommen. Nach Ausräumung des Knochenmarks ist die Kortikalis auf die Ernährung durch die periostalen Arterien angewiesen. Die Autoren berichten von fast totalen Nekrosen des inneren Teils der Kortikalis. Dabei ist eine starke Wucherung und starke Füllung der periostalen Gefäße zu sehen. Trueta und Cavadias sind der Meinung, die Wucherung periostaler Gefäße gehöre stets zur Bildung neuen Knochens. Trotz Gefäßproliferation des Periostes fand Göthmann (1961) nach Marknagelung der nicht frakturierten Kaninchentibia keine periostale Knochenbildung. Andere Autoren wiederum sahen nach Zerstörung der Markgefäße vermehrte periostale Knochenneubildung in der Diaphyse von Röhrenknochen. Die Knochenneubildung war vorwiegend dort zu finden, wo Knochenmark und intrakortikale Durchblutung am meisten zerstört waren (Axhausen und Bergmann 1937, Trueta und Cavadias 1955, De Marneffe 1951, Gustilo et. al. 1964, Richany et. al. 1965, Anderson 1965, Mital und Cohen 1966). Richany behauptet, die gesamte Menge der periostalen Knochendurchblutung stehe in Korrelation zu dem Ausmaß der Knochenmarkszerstörung. Küntscher (1941, 1958, 1961) sieht in der lokalen Azidose, Trueta und Cavadias in der periostalen Hyperämie und der Nekrose der Kortikalis, Johnson, Richany et. al. in Stauung, Ödem und periostaler Anoxie und Zucman et. al. in Knochensplittern des Markes der Kortikalis und des subperiostalen Bereiches die Ursache der vermehrten subperiostalen Knochenneubildung.

Wenn das Innere der Kortikalis nekrotisch wurde, zum Beispiel nach Operationen im Knochenmark, erfolgte die Revaskularisation der Nekrose vom Periost her (Phemister 1930, Röhlich 1941, Trueta und Cavadias 1955, Richany et. al. 1965, Rhinelander 1968). Die Kanälchen in der noch intakten Kortikalis wurden weiter und enthielten mehr Gefäße (Axhausen und Bergmann 1937, Brookes 1960). Die Revaskularisation der Kortikalis-Nekrose geschieht bei der erwachsenen Katze 40 Tage nach der Zerstörung der Blutversorgung des Knochenmarks. Um diese Zeit zeigt die periostale Reaktion rückläufige Tendenz (Richany et. al. 1965). Trueta und Cavadias (1955) fanden, daß sich bei noch wachsenden Kaninchen zwei Drittel der bereits bestehenden Knochennekrose nach 7 Wochen bereits ganz zurückgebildet hatte. Bei erwachsenen Tieren waren die Nekrosen auch nach der 8. Woche noch zu sehen. Resorption im inneren Teil der Kortikalis waren radiographisch nach 4 Wochen feststellbar (Trueta und Cavadias 1955, Richany et. al. 1965). Nach den Beobachtungen von Phemister (1948) werden jedoch größere nekrotische Bezirke in der Kortikalis nicht vollständig revitalisiert.

C) EIGENE EXPERIMENTE

I. Untersuchungsmethoden

1. Klinische Beobachtung:

Die erste Untersuchungsmethode bei unseren Experimenten war, wie ganz allgemein üblich, die klinische Beobachtung, die jedoch speziell im Tierexperiment nur begrenzten Wert besitzt. Immerhin wurden die Tiere täglich besucht, es wurde darauf geachtet, ob das Bein belastet wird oder nicht, ob eine stärkere Schwellung vorhanden ist oder ob eine Infektion im Operationsgebiet vorliegt.

2. Röntgenologische Darstellung:

Es ist bekannt, daß Osteogenese die Leistung von spezifischen Knochenzellen ist, die osteoide Grundsubstanz (kollagene Fibrillen und Mucopolysaccharide) produzieren, welche zunächst strahlendurchlässig, also nicht schattengebend ist. Nach etwa 1o Tagen werden aus dem Blut Calcium und Phosphate aufgenommen und in Form von Apatitchristallen in die osteoide Grundsubstanz eingelagert. Von diesem Zeitpunkt an wird das Knochengewebe allmählich schattengebend. Störungen im Mineralmetabolismus des Knochens machen sich im Röntgenbild bemerkbar. Die Schattendichte ändert sich gegenüber dem normalen Knochen. Akute Veränderungen des Knochengewebes z.B. die akute Unterbindung der Blutzirkulation entgeht der einfachen Röntgendarstellung.

Intaktes Trabekelsystem kann einerseits nach Unterbrechung der Blutzufuhr längere Zeit erhalten bleiben. Andererseits kann auch bei erkennbaren nekrotischen Veränderungen der Knochenstruktur bereits wieder eine vollwertige oder sogar verstärkte Vaskularisation vorliegen. Da aber die Durchblutungsstörung der entscheidende pathogenetische Faktor für Heilungsstörungen des Knochens ist, war es notwendig, Untersuchungsmethoden anzuwenden, deren Aussage über die Vitalreaktion des Knochens zuverlässiger erschien. So wurden zur Dokumentation der Bruchform und Bruchlokalisation, der Art der Osteosynthese und als Verlaufskontrolle der Heilungsvorgänge jeweils Röntgenbilder in 2 Ebenen angefertigt.

3. Angiographie und Mikroangiographie:

Besonders aufschlußreiche Informationen über die Knochenbruchheilung und über die arterielle Blutversorgung in einem unversehrten und in einem frakturierten oder heilenden Knochen konnten von der Darstellung des Gefäßsystems erwartet werden. Lexer und seine Schule publizierten bereits 1904 Arbeit über die Blutversorgung des Knochens. Ihre Methoden waren jedoch sehr mühsam und letzten Endes wenig leistungsfähig. 1914 publizierte Spaltholz eine neue Methode, die für die Untersuchung am Menschen und am Tier gleichermaßen geeignet ist. Hammersen und Seidemann (1964), Olernd und Görem (1968) erzielten sehr gute Ergebnisse mit dem Spaltholz-Verfahren. Sie zeigten detaillierte Mikroangiographien.

Das in dieser Arbeit benutzte Verfahren ist eine Modifikation der Angiographie und Mikroangiographie, wie sie erstmals von Trueta und seinen Mitarbeitern angegeben wurde. Sie benutzten die Methode 1947 zu Untersuchungen der Nierengefäße und 1953 zur Darstellung der Knochengefäße. Göthmann, Rhinelander und Mitarbeiter verwandten für ihre Untersuchungen der Knochendurchblutung dasselbe Verfahren.

Als Kontrastmittel diente Micropaque (Damanecy & Co.), eine Wasserkolloidlösung von Bariumsulfat (Teilchengröße o,5µ), die wenig Neigung zur Zusammenballung besitzt. Die kleine Teilchengröße ermöglicht die Passage von Kapillaren. Die Bariumsulfatteilchen haften an der Gefäßwand, verkleben in den Gefäßen und verschließen allmählich das Lumen.

Vor der mikroangiographischen Darstellung der Gefäße wurden die Knochen erst in 5%-iger Salpetersäure entkalkt, dann wurden die Präparate geschnitten. Je dünner die Knochenschnitte, um so übersichtlicher sind die Gefäßabbildungen, um so leichter fällt die Analyse der Gefäßverteilung in Lupenvergrößerung. Zur Mikroröntgenographie wurde eine spezielle Röntgenröhre benutzt. Die Röhre strahlt weiche Strahlen aus. Die Strahlen durchdringen das Bariumsulfat in Arterien und Arteriolen nicht, und werden daher auf dem Röntgenfilm als Schatten dargestellt. Um eine gute Abbildung zu bekommen, ist ein hochempfindlicher, feinkörniger Röntgenfilm zu verwenden.

4. Technik der Angiographie:

An gesunden, erwachsenen, mit Nembutal (i.V.) narkotisierten Hunden wurden Arteria und Vena femoralis freipräpariert. In jedes Gefäß wurde ein Katheter von 2 mm Durchmesser distalwärts geschoben und fixiert. Über den Katheter wurde in die A. femoralis, je nach Gewicht des Hundes, 1 - 3 ml Liquimin (Heparin) gespritzt. Danach wurde an den arteriellen Katheter eine Infusion mit körperwarmer 3o%-iger Suspension von Micropaque in physiologischer Kochsalzlösung oder in Ringerlösung angeschlossen. In die Infusionsfalsche wurde Luft gepumpt, sodaß die $BaSO_4$-Suspension mit einem Druck von 12o - 135 mm Hg in das Gefäßsystem floß.

Danach wurde der Hund durch eine Überdosis von Nembutal getötet. Zunächst fließt aus dem Venenkatheter reines Blut, dann eine Mischung von Blut und $BaSO_4$. Nach 8-12 Minuten enthält der venöse Katheterrückfluß nur noch Micropaque-Suspension. Von diesem Zeitpunkt ab wurde eine körperwarme Suspension von 3o%-igem Micropaque und 1o%-igem Formalin infundiert. Das Bein wurde im Hüftgelenk amputiert. (Die Amputation soll so hoch sein, daß wenige oder keine Äste der A. femoralis profunda durchgetrennt werden müssen). Das Bein wurde in eine Lösung von 6o%-igem Alkohol und 1o%-igem Formalin gestellt. Die Infusionsflaschen mit Micropaque/Formalinlösung hingen 2 m über dem Gefäßsystem, wodurch ein konstanter hydrostatischer Druck auf dem Katheter bzw. auf der Arterie lastete. Nach 2o-3o Minuten

sistierte im allgemeinen der Fluß aus dem Venenkatheter. Nach 24 Stunden wurden die Infusionsflaschen entfernt, die Tibia von den Weichteilen bis auf das Periost befreit und zwei Röntgenbilder der Tibia in 2 Ebenen angefertigt. Der Knochen wurde quer in drei Stücke gesägt und in 1o%-igem Formalin fixiert. Die Fixation dauerte etwa 5 Wochen. Danach wurden die Knochenstücke in Salpetersäure entkalkt. Aus den Knochenstücken wurden Schnitte von o,7 - 1,5 mm Dicke angefertigt. Die Schnittrichtung wurde quer und längs gewählt. Die Mikroangiogramme wurden mit Dermopan (Therapie-Siemens-Röhre, Typ AEW 5o/25 Ö, 29 kV bei Durchfluß von 25 m As in 15 Sekunden) angefertigt. Objekt und Röntgenfilm befanden sich in einem Abstand von 1,3o m von der Brennfläche. Als Filmmaterial wurden fein granulierte Röntgenfilme, Typ Structuri D 4, der Firma Gevaert verwandt. Die Mikroangiogramme wurden dann unter der Lupe ausgewertet.

PHYSIOLOGISCHE BLUTVERSORGUNG DER TIBIA DES HUNDES

1. Versuchsserie:

An 7 gesunden ausgewachsenen Hunden wurden zur Überprüfung der physiologischen Blutversorgung die Gefäße der Tibia nach der oben beschriebenen Methode dargestellt.

Befunde:

Die A. nutritia stammt aus dem Anfangsteil der A. tibialis posterior und verläuft dorsolateral zum Foramen nutritium tibiae an der lateralen Rückfläche der Tibia. Am Ende des proximalen Drittels der Tibia tritt die Arterie schräg in die Kortikalis der Tibia ein und verläuft distalwärts im Canalis nutritium in einem Winkel von etwa 10^{o} zur Knochenoberfläche. Diesen Winkel behält sie bis zum Eintritt in die Knochenmarkhöhle bei. Direkt nach Einmündung in die Markhöhle teilt sie sich in einem medialen (proximalen) und lateralen (distalen) Ast auf. Die beiden Äste verlaufen erst in der selben Richtung wie die Stammarterie. Der mediale Ast teilt sich relativ früh in 2, 3 ja bis 4 Äste auf. Die einzelnen Äste haben annähernd den selben Durchmesser. Etwa in der Mitte des Knochenmarks steigen die Äste des medialen Stammes in einem U-förmigen Bogen proximalwärts empor. Anfänglich sind sie spiralig gewunden, dann verlaufen sie geradlinig. Auf dieser Verlaufstrecke geben sie bis zur Epiphyse Äste an das gesamte Knochenmark ab. Im Bereich der Epiphyse kommunizieren sie mit 2 arteriellen Systemen der Tibiaenden (Abb. 1).

Im ersten System wird die Epiphyse aus dem Rete articularis genu versorgt. Die vorne und medial liegenden Gefäße treten in die Epiphyse an der Ansatzstelle der Gelenkkapsel und der Muskelursprungsstellen ein. Sie sind zahlreich und zart. Die lateralen und dorsalen Gefäße der Epiphyse sind etwas dicker als die vorne und medial eintretenden Gefäße. In der Insertionsstelle der Kreuzbänder tritt das 2. Gefäßsystem ein. Es besteht aus 2 - 3 mittelstarken Ästen. Sie verästeln sich in der Epiphyse und bilden zusammen mit dem Gefäßsystem aus dem Rete articularis genu ein Gefäßnetz, das die Epiphyse und den proximalen Teil der Metaphyse mit Blut versorgt. Sie anastomosieren, wie schon erwähnt, mit den Arterienästen aus der Arteria nutritia (Abb. 2a).

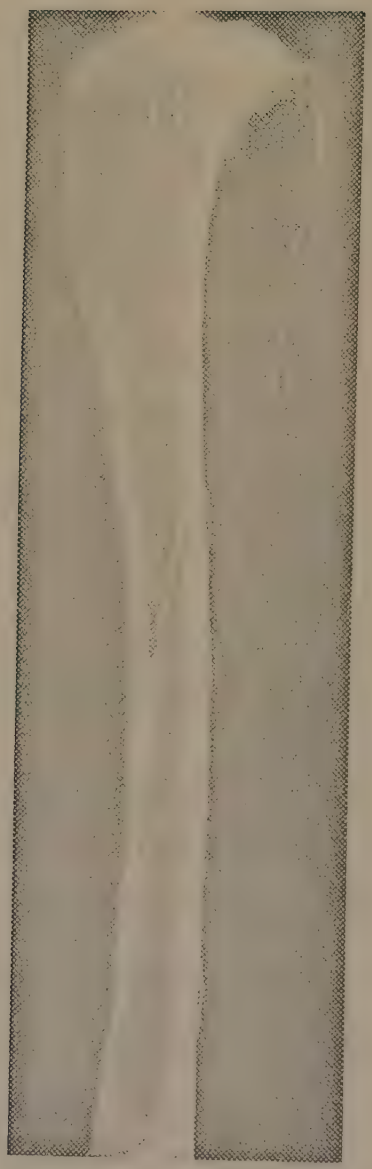


Abb. 1:

Übersichtsangiogramm einer Hundetibia. An der Fibularseite eintretende A. nutritia und ihre Aufzweigungen im Knochenmark. Mehrere Äste ziehen in die proximale und ein Ast in die distale Epiphyse.

Der absteigende (laterale) Arterienast der A. nutritia gibt zunächst nur kleine Äste an das Knochenmark und die Kortikalis ab. Er verläuft schräg wie der Hauptstamm bis über die Mitte des Knochenmarks hinaus, um dann in einem Bogen von unterschiedlichem Ausmaß zurück in die Mitte der Markhöhle zu gelangen. Die Arterie steigt dann fast geradlinig distalwärts ab, teilt sich in 2 bis 3 zarte Äste, die ihrerseits das Knochenmark distalwärts mit Blut versorgen. Die Gefäße verlaufen parallel zur Kortikalis (Abb. 1).

In der distalen Epiphyse treten, aus dem Rete malleolare kommend, mittelgroße Arterien ein. Sie gelangen in die Epiphyse aus allen Richtungen, ohne Bevorzugung einer bestimmten Seite. Das so dargestellte Gefäßnetz durchzieht die Epiphyse, ist jedoch nicht so dicht verzweigt wie in den proximalen Endstücken. Anastomosen mit den Ästen der Arteria nutritia sind auch hier häufig (Abb. 2c).

Die Blutversorgung der Kortikalis stammt aus 2 Systemen: Aus dem endostalen und periostalen Gefäßsystem.

Direkt nach dem Eintreten der A. nutritia in die Markhöhle werden kleine Äste an die Kortikalis abgegeben. Vom absteigenden Arterienast ziehen mehrere dünne Ästchen parallel zueinander zur Kortikalis. Der übrige proximale und distale Teil der Compacta bezieht seine Blutversorgung aus den Markhöhlenarterien, die zur Kortikalis parallel verlaufen. Diese kleinen Arterien dringen in die Kortikalis in verschiedenen Winkeln ein. Vom Markraum kommend, verbleiben sie in den

ersten zwei Dritteln der Kortikalis. Eine kleinere Zahl von Ästchen durchsetzt die ganze Kortikalis bis zum Periost. Dort anastomosieren sie mit den periostalen Arterien. Anastomosen treten dort öfter auf, wo die Kortikalis dünn ist. Hier ist es manchmal schwer die periostalen von den medullären Gefäßen zu unterscheiden (Abb. 2b und 2d). Die periostalen Gefäße versorgen das äußere Viertel bis äußere Drittel der Kortikalis. Proximal gelangen auf der dorsalen und lateralen Seite der Tibia periostale Gefäße direkt aus den Muskelansätzen in die Compacta. Auf der medialen und vorderen Seite des Schienbeines und dem ganzen distalen Teil des Schienbeines ist das Periost von Bindegewebe und der Fascia cruris bedeckt. Im Bindegewebe verlaufen in der Längsrichtung mehrere mittelstarke Gefäße. Die entstammen proximal dem Rete articulare genu. In der Diaphyse entkommen sie aus dem Rami musculares umliegender Muskeln oder aus den großen Gefäßen direkt (A. tibialis anterior und A. tibialis posterior). Distal stammen sie aus dem Rete malleolare. Aus den oben genannten Arterien zweigen fast immer rechtwinklig aber in derselben Ebene feine Gefäße in das Äußere des Periostes ab und bilden ein feines Gefäßnetz. In der inneren Schicht des Periostes befindet sich ein weiteres Gefäßnetz, das noch dichter ist und das auf feineren Gefäßen aufgebaut wird. Von diesem Gefäßnetz treten kurze Äste in das äußere Viertel bis Drittel der Kortikalis über. Einige Äste kommunizieren wie schon oben beschrieben mit den medullären Gefäßen. An dünnen Stellen der Kortikalis treten

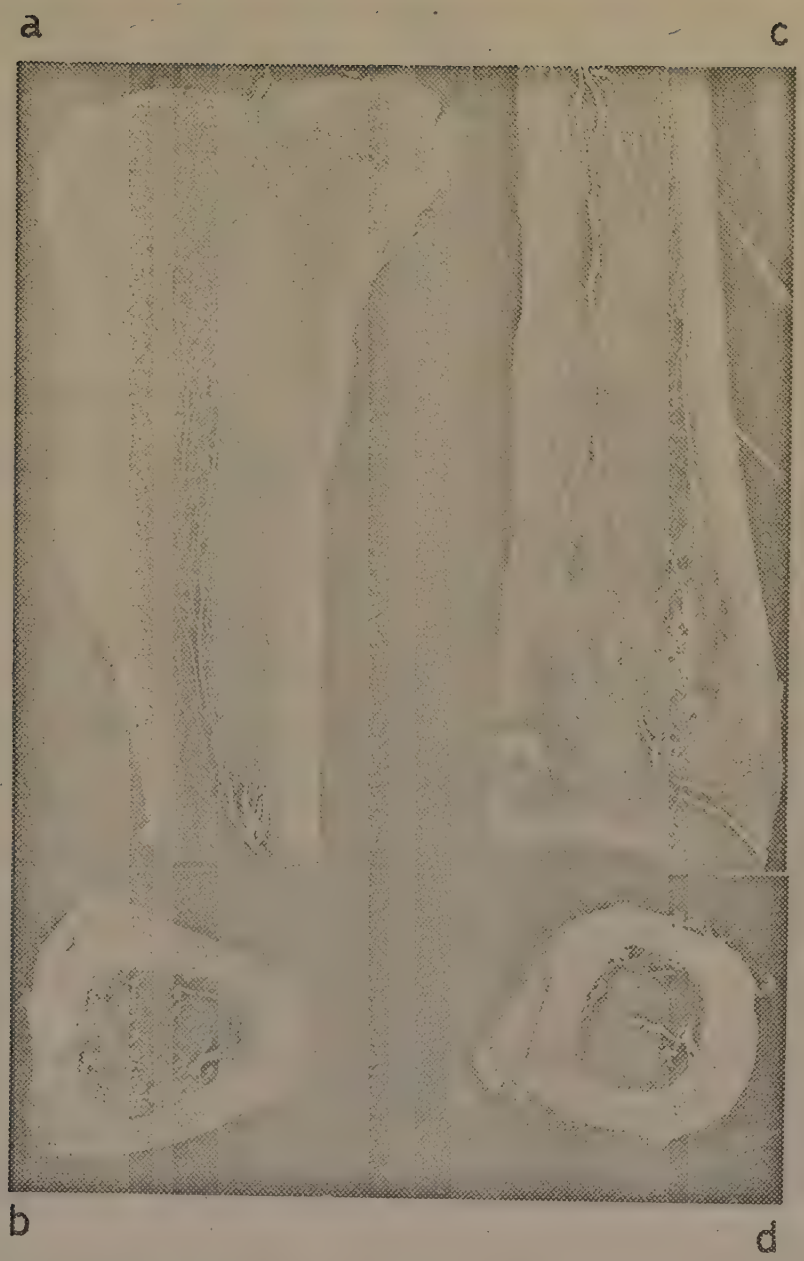


Abb. 2:

Mikroangiogramme einer normalen Hundetibia
a) Längsschnitt proximales Drittel. b) Querschnitt proximales Drittel. c) Längsschnitt distales Drittel. d) Querschnitt distales Drittel.
In die Epiphysen eintretende Gefäße. Anastomosen zwischen Epiphysengefäßen und Ästen der A. nutritia.
Radiär verlaufende Arteriolen aus dem Markraum durchziehen die Kortikalis mindestens bis zur äußeren Drittelgrenze.

vermehrt Anastomosen auf. Hier ist die Knochenrinde so dünn, daß eine Unterscheidung zwischen periostalem und medullärem Ursprung nicht möglich ist.
Es muß noch bemerkt werden, daß die Fibula von der Mitte der Tibia an, distalwärts der Tibia eine straffe Syndesmose bildet, jedoch ihr eigenes Gefäßsystem besitzt.

II. DIE KNOCHENBRUCHHEILUNG DER DIAPHYSE DES RÖHRENKNOCHENS UNTER RUHIGSTELLUNG DURCH GIPSVERBAND

2. Versuchsserie

Sieben Hunden mit röntgenologisch geschlossener Epiphysenfuge wurden in Nembutalnarkose die rechte Tibia, etwa in Schaftmitte, ohne Verletzung der Haut frakturiert. Zur Dokumentation der Fraktur wurden Röntgenbilder in 2 Ebenen angefertigt. Die Brüche wurden sofort unter Kontrolle eines Röntgenbildverstärkers reponiert. Dann wurde ein zirkulärer Gipsverband unter Einschluß der benachbarten Gelenke angelegt. Der Gips wurde gespalten, um einer eventuellen Schwellung und nachfolgenden Stauung des Beins vorzubeugen. Die Hunde wurden unter Bedingungen gehalten, die ihnen Bewegung erlaubten. Sie standen, ohne daß sie das gebrochene Bein belasteten. Gelegentlich mußte der Gipsverband erneuert werden, da er gebrochen war, oder die Hunde ihn abgebissen hatten. Vor Tötung der Tiere wurden erneut Röntgenbilder in 2 Ebenen angefertigt und zur Gefäßdarstellung schließlich so verfahren, wie auf Seite 18 ausführlich beschrieben worden war.

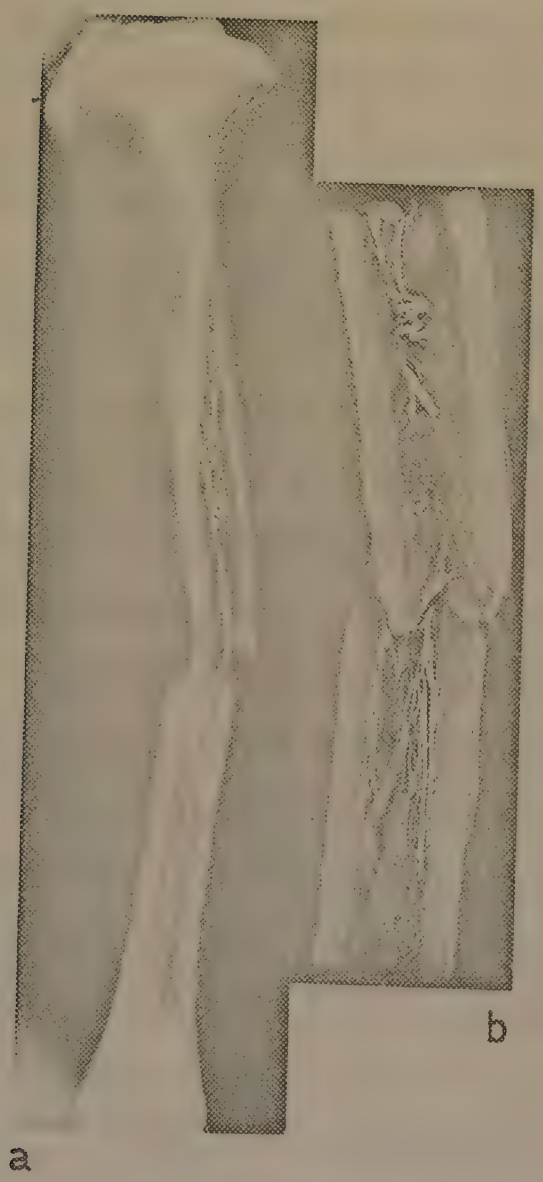


Abb. 3:

Gipsruhigstellung über 7 Tage
a) Übersichtsangiogramm. b) Mikroangiogramm.
Die 7 Tage alte Fraktur steht in dislocation ad axim et latus. Trotzdem läuft der distale Ast der A. nutritia durch den Bruchspalt hindurch. Die Markgefäße im Frakturbereich sind dicker und zahlreicher als die periostalen Gefäße.

Die 7 Hunde wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Frakturbehandlung getötet: nach 1 Woche, 1o Tagen, 2, 3, 6, 12 und 2o Wochen.

Ergebnisse:

1. Nach 7 Tagen Gipsruhigstellung (Abb. 3):

Die 7 Tage alte Fraktur von Tibia und Fibula liegt im mittleren Drittel. Es ist ein dorsaler Biegungskeil und eine kleine Trümmerzone am distalen Fragment zu sehen. Callusbildung ist röntgenologisch noch nicht erkennbar. Die Angiogramme zeigen A. nutritia, die regelrecht etwa 2 Querfinger oberhalb der Fraktur in die Kortikalis eintritt. Das proximale aszendierende Gefäßbündel ist unverletzt. Der aszendierende Ast zieht, nachdem er sich in 3 Äste aufgeteilt hat, in Frakturrichtung und überquert die Frakturregion ohne Unterbrechung. Im Vergleich zu der A. nutritia der linken gesunden Tibia ist eine deutliche Hypertrophie der Gefäße zu beobachten. Auch die Mikroangiographie zeigt Hyperaktivität der medullären Durchblutung. Aus den medullären Gefäßen wachsen gewundene feine Gefäße in den Frakturspalt der Kortikalis ein. Auch die periostalen Gefäße sind aktiviert, allerdings geringer als die medullären Gefäße. Aus dem Periost ziehen ebenfalls feine Gefäße in den Frakturspalt.

2. Nach 1o Tagen Gipsruhigstellung:

1o Tage alte kurze Schrägfraktur mit einem distalen Biegungskeil. Ein zweimaliger Gipswechsel war erforderlich. Nach Tötung des Tieres fand man eine Seitenverschiebung der Fraktur um Kortikalisbreite mit einer Verkürzung des Beines um 2 cm. Im Frakturbereich wurde ein ausgedehntes perifrakturelles altes und frisches Hämatom beobachtet. Das Hämatom war zum Teil auch subperiostal entwickelt. Röntgenologisch war keine Callusbildung nachweisbar. Angiographisch läßt sich die A. nutritia im distalen Knochenfragment darstellen. Offenbar bekam der distale Teil der A. nutritia seine Blutzufuhr aus der Anastomose mit der distalen Epiphyse. Im proximalen, insbesondere im metaphysären und epiphysären Bereich sind fetzenartig kleine Kontrastmittelpfützen sichtbar. Mikroangiographisch ist eine sehr starke endostale Gefäßaktivität zu beobachten. Das Periost war durch ein Hämatom im Frakturbereich vom Knochen zum großen Teil abgehoben und eine periostale Aktivität war nicht erkennbar.

3. Nach 2 Wochen Gipsruhigstellung:

Fraktur in der Mitte der Schienbeindiaphyse mit einer Dislokation zur Seite. Die Fraktur wurde vor dem Eingipsen reponiert. Nach 14 Tagen findet man eine deutliche unverkalkte Callusbildung im Frakturbereich vor. Die Fraktur ist noch nicht stabil. Der Frakturspalt ist breit und mit

dem alten Hämatom ausgefüllt. Die A. nutritia und ihre proximalen Äste laufen unverletzt und normal, der distale Ast reicht nur bis in den Frakturbereich. Hier endet der Gefäßfächer. Die medullären Gefäße im distalen Knochenstück sind stark entwickelt. Sie bekommen ihre Blutversorgung von Epi- und von der Metaphyse. Der periostale Callus ist sehr stark vaskularisiert. Die großkalibrigen Gefäße überbrücken mit dem periostalen Callus die Fraktur. Sie wachsen wie der medulläre Gefäßbaum vereinzelt in den Frakturspalt ein.

4. Nach 3 Wochen Gipsruhigstellung (Abb. 4):

Schrägfraktur in der oberen Hälfte des mittleren Drittels der Tibia mit Seitdislokation. Nach 3 Wochen steht die Fraktur in leichter, nach dorso-lateral offener Winkelbildung. Der Bruchspalt ist noch röntgenologisch erkennbar. Ein fibröser Callus verbindet die beiden Knochenstücke und stabilisiert die Fraktur. Eine deutliche Verkalkung im periostalen Callus beiderseits der Fraktur ist erkennbar. Knapp oberhalb der schräg verlaufenden Frakturlinie tritt die A. nutritia ein. Der proximale Ast der A. nutritia steigt normal empor. Distal der Frakturzone befindet sich eine kräftige medulläre Arterie. Eine eindeutige Kontinuität des distalen Astes der A. nutritia über den Bruchspalt hinweg ist nicht feststellbar. Offenbar werden die distalen medullären Gefäße über Anastomosen aus den distalen Epiphysengefäßen gespeist. Die Mikroangiogramme zeigen einen breiten

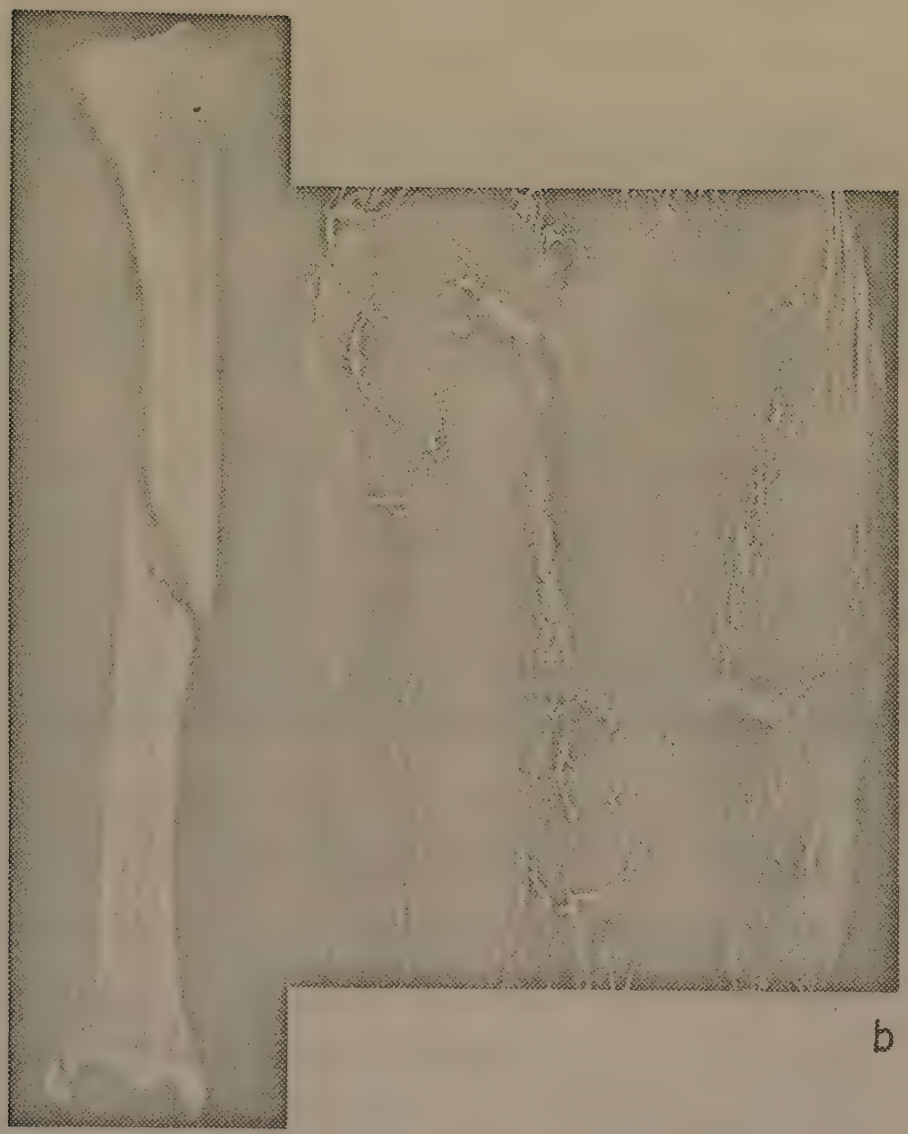


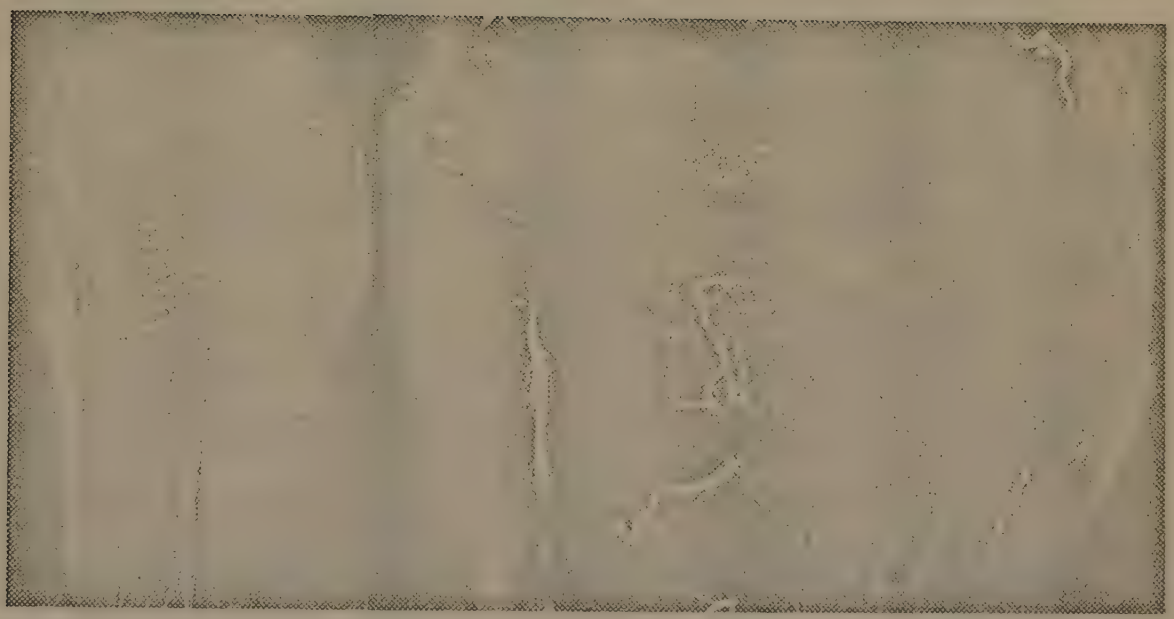
Abb. 4:

Gipsruhigstellung über 3 Wochen.
a) Übersichtsangiogramm
b) Mikroangiogramm von der Bruchstelle.
Im Knochenmark wachsen die Arteriolen vermehrt in den Bruchspalt ein. Gut vascularisierter Callus. Einige unbedeutende Arteriolen versuchen vom periostalen Callus aus in den Bruchspalt einzuwachsen.

avaskulären Frakturspalt. Von den medullären Arterien wachsen Arteriolen baumartig in den noch gefäßfreien Frakturspalt. Vergleicht man endostales und periostales Gefäßsystem, so überwiegt die Aktivität des endostalen Systems ganz deutlich.

5. Nach 6 Wochen Gipsruhigstellung (Abb. 5):

Querfraktur in Schaftmitte mit Dislokation zur Seit und leichter nach dorso-lateral offener Winkelbildung. Der Hund konnte nach 4 Wochen das Bein wieder belasten.
6 Wochen nach der Fraktur zeigte das Röntgenbild einen mächtigen periostalen Fixationscallus, der die Fraktur stabilisiert. Die Röntgenbilder zeigen jedoch, daß der verkalkte Callus die Fraktur nicht überbrückt. Auch mikroangiographisch ist deutlich ein getrenntes proximales und distales Arteriensystem zu sehen. Das distale, medulläre Gefäßsystem ist mächtig entwickelt. Im periostalen Callus sind längsverlaufende mittelgroße ehemalige periostale Arterien eingebettet. Mikroangiographisch sind baumartig verästelte Gefäße im gesamten Bruchgebiet und im Callus zu sehen, die periostalen und medullären Arteriolen anastomosieren. Von dem im Röntgenbild und im Übersichtsangiogramm zu sehenden Frakturspalt ist im Mikroangiogramm nur ein dünner Spalt dargestellt in Form einer dünnen avaskulären Zone. Der avaskuläre Spalt wird an einigen Stellen durch Arteriolen überbrückt, die aus dem medullären Gefäßsystem entspringen. Angiographisch scheint das medulläre



a b

Abb. 5:

Gipsruhigstellung über 6 Wochen
a) Mikroangiogramm. b) Stark vergrößertes Bild des Frakturgebietes.
In Abb. 5a) sieht man im Frakturgebiet im Gegensatz zum frakturfernen Gebiet eine Vermehrung der Knochenmarkgefäße. Im Bild links erkennt man ehemalige periostale Arterien, jetzt im periostalen Callus eingebettet.
Abb. 5b) zeigt in den Bruchspalt wachsende Knochenmarkgefäße. Vom Knochenmark her durchbohren einige Gefäße die ganze Kortikalis bis in den periostalen Callus.

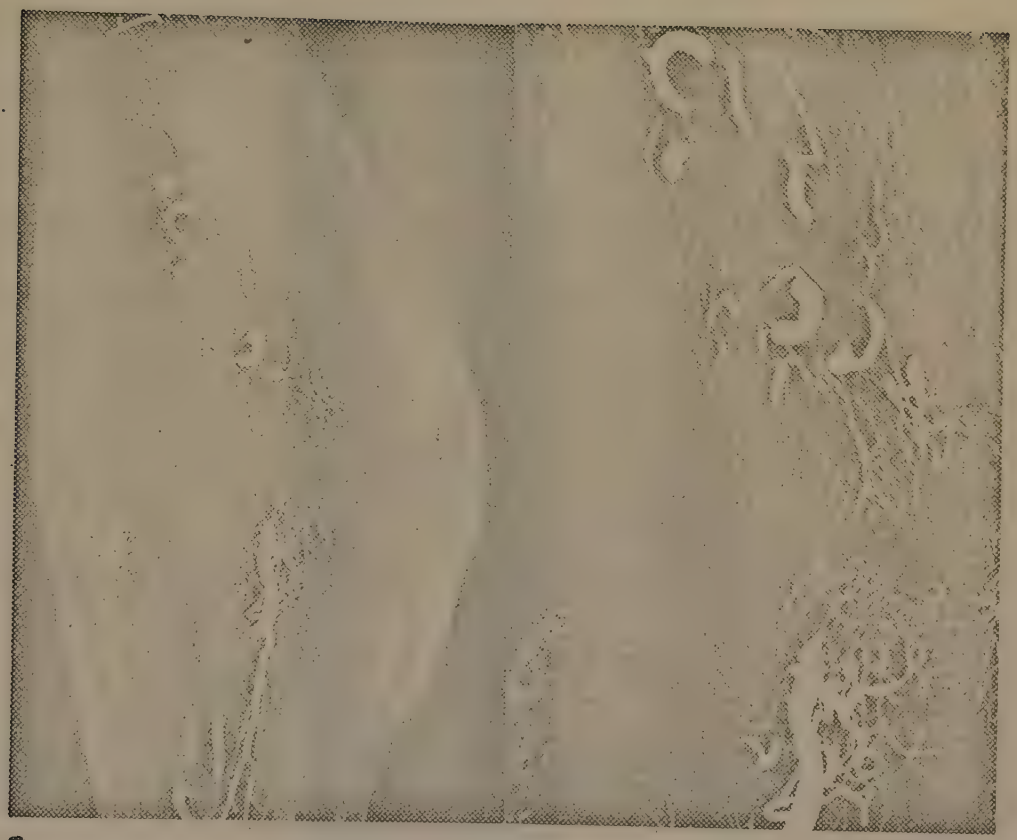
Gefäßsystem in ein proximales und ein distales getrennt zu sein, jedoch ist eine mikroangiographische Kommunikation stellenweise nachweisbar. Die ursprüngliche Kortikalis, die vom Callus ummauert ist, wird fast ausschließlich von medullären Arterien versorgt.

6. Nach 12 Wochen Gipsruhigstellung (Abb. 6):

Querfraktur in Schaftmitte ohne wesentliche Dislokation. Nach 12 Wochen ist das Bein wieder hergestellt und der Knochen steht in der geheilten Bruchzone in einer leichten dorso-lateralen Winkelstellung. Der spindelförmige Callus um die Fraktur weist einen kräftigen Kalksalzgehalt auf. Die Frakturzone ist insgesamt noch auf einer Breite von 3 mm an ihrem verminderten Kalksalzgehalt erkennbar. Eine kräftige A. nutritia tritt einen Querfinger oberhalb der Frakturzone ein, gibt einen kräftigen durchgehenden Ast bis tief in das distale Fragment ab. Die medullären Arterien sind stark gewunden.
Mikroangiographisch stellt sich ein Bild dar, das dem aus der 6 Wochen alten Fraktur sehr ähnlich ist. Die medullären Arterien wachsen bis in den periostalen Callus vor.

7. Nach 2o Wochen Gipsruhigstellung (Abb. 7):

Kurzer Schrägbruch der Tibia in idealer Stellung reponiert und fixiert. 2o Wochen nach der Fraktur ist eine völlige knöcherne Ausheilung erreicht. Die knöchern vereinigten Fragmente stehen in leichter dorso-lateraler Abwinkelung.



a b

Abb. 6:

Gipsruhigstellung über 12 Wochen

a) Mikroangiographie

b) Stark vergrößertes Bild des Frakturgebietes.

Mit spindelförmigem Callus verheilte Fraktur. Eindeutig vermehrte Knochenmarkgefäße im Frakturgebiet. Einige durchbohren die Kortikalis bis in den periostalen Callus. Die Arteriolen durchkreuzen die Frakturlinie.

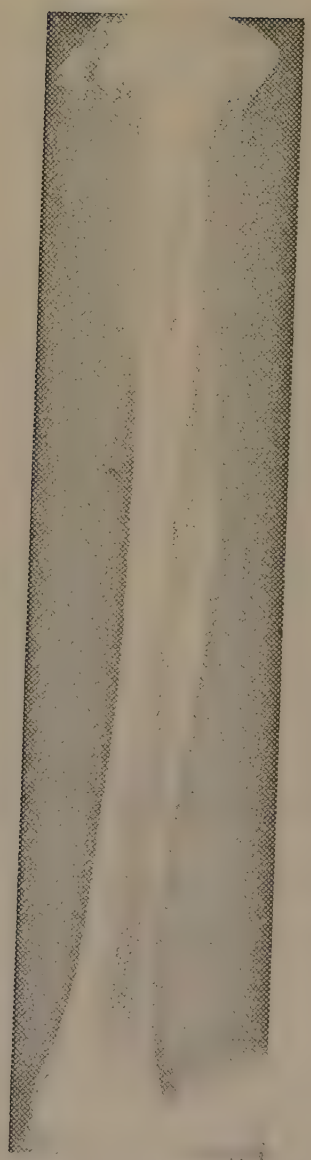


Abb. 7:

Gipsruhigstellung über 2o Wochen.

Völlig ausgeheilte Fraktur mit normal laufender A. nutritia und ihren Ästen. Im ehemaligen Frakturgebiet macht der descendierende Ast der A. nutritia einen Bogen, der bis in die Kortikalis reicht.

Ein spindelförmiger kalkdichter Callus, der offenbar im Bereich der Fraktur einmal vorhanden war, ist fast völlig abgebaut worden. Der Verlauf der Gefäße entspricht dem normalen Verlauf. Auch mikroangiographisch ist kein Zeichen einer Fraktur mehr zu sehen. Das medulläre System hat sich vollständig wieder aufgebaut. Die Kortikalis wird fast ausschließlich aus den medullären Gefäßen versorgt.

III. KNOCHENBRUCHHEILUNG DER DIAPHYSE LANGER RÖHRENKNOCHEN NACH GESCHLOSSENER UND OFFENER MARKNAGELUNG

3. Versuchsreihe

Die Marknagelung eines Diaphysenbruches kann auf 2 Arten erfolgen: durch Einschlagen des intramedullären Kraftträgers vom bruchfernen Knochenende aus ohne und mit Eröffnung des Bruches - geschlossene und offene Nagelung. Um das Ausmaß der zusätzlichen operativen Schädigung des Periostes zu untersuchen, wurde je eine Serie von Tibiafrakturen geschlossen und offen genagelt, und schließlich angiographisch und mikroangiographisch untersucht.

Bei 7 Hunden wurde von der Tuberositas Tibiae aus ein V-förmiger Marknagel in die Markhöhle unter Bildverstärkerkontrolle eingeschlagen, ohne die Frakturzone zu eröffnen. Vor und nach der Nagelung wurden Röntgenaufnahmen angefertigt. Fast alle Tiere konnten einen Tag nach der Operation stehen, jedoch das Bein noch nicht belasten. Die Hunde wurden nach 1 Woche, nach 1o Tagen, nach 2, 3, 6, 12 und 24 Wochen getötet. Nachdem vorher noch eine Röntgenaufnahme angefertigt wurde, um die Heilungsvorgänge zu überprüfen.

Ergebnisse:

1. 1 Woche nach geschlossener Marknagelung (Abb. 8):

Querfraktur am Ende des proximalen Drittels der Tibia. Die Fraktur wurde durch kräftigen V-Nagel stabilisiert, mit ge-

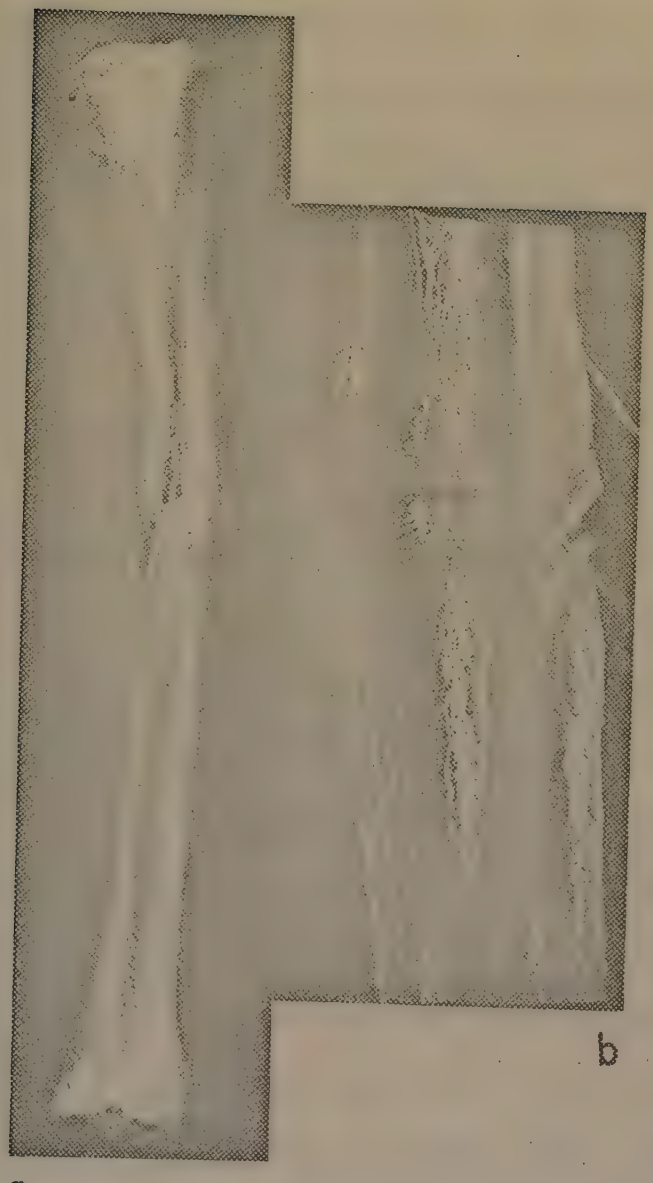


Abb. 8:
Eine Woche nach geschlossener Marknagelung
a) Übersichtsangiogramm
b) Mikroangiogramm des Frakturbereiches
Vermehrte Arteriolen im Frakturgebiet, im Knochenmark mehr als im periostalen Bereich. Im Bild 8b, links sind Knochenmark und Kortikalis stark vascularisiert. Rechts ist das Knochenmark nicht vascularisiert. Hier ist die Kortikalis trotz starker periostaler Vascularisation avasculär.

ringer Einstauchung der Fraktur, in deren unmittelbarer Nähe die A. nutritia in die Markhöhle eintritt. Nach Extraktion des Nagels läßt sich angiographisch die A. nutritia mit ihrem erhaltenen Fächer erkennen. Der distale Teil der A. nutritia ist durch die Marknagelung zerstört. Die entkalkten Knochen zeigen in Quer- und Längsschnitt, daß das verbliebene Knochenmark eine sehr starke Vaskularisation erfährt (Abb. 8b). Es wachsen sehr dicht kurze, unregelmäßige, zum Teil spiralförmige Gefäßverzweigungen aus. Diese entstammen entweder den Epiphysenarterien oder der A. nutritia. In der proximalen und distalen Epiphyse finden sich kräftige Anastomosen. Die periostalen Arterien sind ebenfalls dicker und zahlreicher geworden. Auch in den Weichteilen um die Fraktur herum ist eine Wachstumsaktivität der Gefäße vorhanden. Die Aktivität ist besonders an der dorsalen und lateralen Seite der Tibia ausgeprägt. Die Gefäße wachsen in Richtung der avaskulären Zone des Frakturhämatoms und des Bruchspaltes. Es sind dünne spiralförmige Gefäße, die manchmal baumartiges Aussehen haben. Wo das Knochenmark nicht vascularisiert ist bleibt, trotz starker periostaler Vascularisation die Kortikalis in der Nähe der Fraktur avasculär (Abb. 8b).

2. <u>1o Tage nach geschlossener Nagelung (Abb. 9):</u>

Eine nicht dislozierte Fraktur in Schaftmitte, durch etwas zu kurzen und zu dünnen Nagel in idealer Stellung stabilisier
An der medialen Seite befindet sich ein kleiner Biegungskeil. 1o Tage nach der Nagelung zeigt die Fraktur einen Fixations-

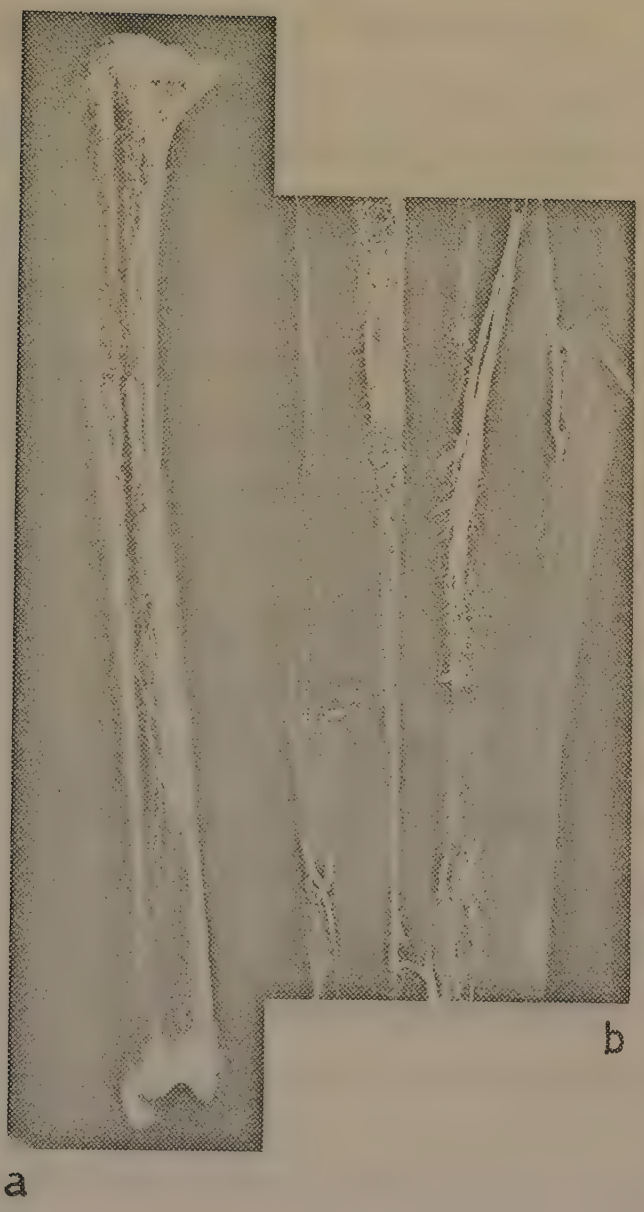


Abb. 9:
1o Tage nach geschlossener Marknagelung
a) Übersichtsangiogramm
b) Mikroangiogramm des Frakturgebietes
Man sieht fast normal verlaufende Markarterien. Das Lumen der Gefäße ist lediglich erweitert und die Zahl der sichtbaren Gefäße vermehrt. Durch den V-förmigen Nagel sind die Markgefäße zur Seite gedrängt.

callus. Nach der Nagelextraktion sieht man die ordnungsgemäß in die Markhöhle eintretende A. nutritia, die etwas an die Wand gepreßt ohne Unterbrechung nach proximal und distal verläuft. Auffällig sind besonders im proximalen Drittel Extravasate, die offenbar auf Gefäßverletzungen während der Nagelung zurückzuführen sind. Periostal verlaufen vorwiegend fibularseitig parallel zum Knochen dicke und gewundene Arterien. Mikroangiographisch sieht man vermehrte Gefäßzeichnungen im Verlauf der ganzen Marknagellänge, besonders jedoch im Frakturbereich. Die großen medullären Gefäße verlaufen in der Rinne des V-förmigen Nagels. Kleinere Gefäße wachsen um den etwas zu dünnen Nagel herum. Von den medullären und periostalen Gefäßen wachsen Arteriolen in den Bruchspalt ein. Mikroangiographisch wird deutlich, daß die Kortikalis aus den Gefäßen des medullären Raumes versorgt wird, während die Gefäße des Periostes der Kortikalis aufliegen ohne wesentliche Abzweigungen zur Kortikalis abzugeben.

3. 2 Wochen nach geschlossener Marknagelung (Abb. 1o):

Querfraktur in der Mitte der Tibia mit einem nach vorne liegenden Biegungskeil, wurde mittels eines dicken Nagels fixiert. Nach 2 Wochen ist kein wesentlicher Callus zu beobachten. Die A. nutritia tritt regelrecht in die Markhöhle ein und verteilt sich, etwas an die Wand gepreßt, nach proximal und distal. Die großen medullären Arterien verlaufen in der Rinne des V-förmigen Nagels. Vom Mark

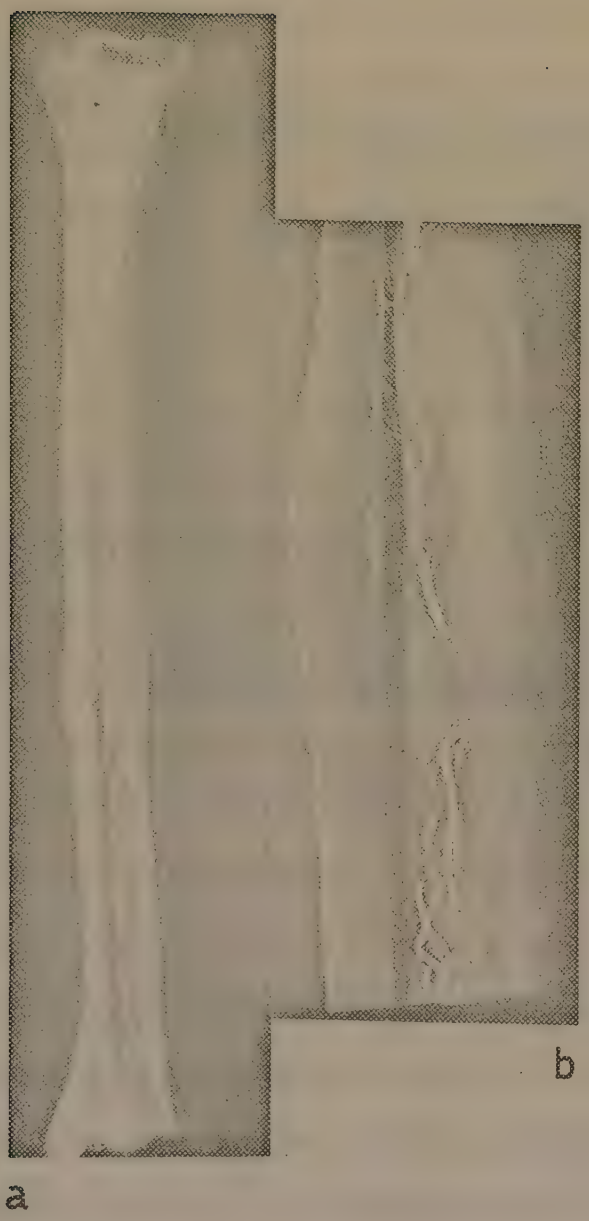


Abb. 1o:
14 Tage nach geschlossener Marknagelung
a) Übersichtsangiogramm
b) Mikroangiogramm des Frakturgebietes
Man sieht fast normal verlaufende Markarterien. Das Lumen der Gefäße ist lediglich erweitert und die Zahl der sichtbaren Gefäße vermehrt. Durch den V-förmigen Nagel sind die Markgefäße zur Seite gedrängt.
In Abb. 1ob) rechts sieht man ein gefäßloses Knochenstück im Frakturbereich.

und von dem dünnen periostalen Callus wachsen gewundene mehrfach verzweigte Arteriolen in den Frakturbereich ein. Ein isoliert liegendes Knochenfragment ist nicht vaskularisiert. Im Vergleich zu den vorher beschriebenen Fällen ist die Gefäßaktivität etwas geringer.

4. 3 Wochen nach geschlossener Marknagelung (Abb. 11):

Querfraktur im mittleren Bereich der Tibia, die durch einen etwas zu dünnen Nagel versorgt wurde. Nach 3 Wochen läßt sich eine leichte Abwinkelung des Nagels nach medial erkennen. Die Verteilung der A. nutritia ist normal und ununterbrochen. Die Arterien sind durch den etwas zu dünnen Marknagel nach allen Seiten verdrängt. Sie verlaufen nicht nur in der Rinne des V-förmigen Nagels. Sie sind hypertrophiert, zahlenmäßig vermehrt und stärker gewunden als die normalen Arterien. Die periostalen Arterien sind ebenfalls hyperaktiviert und stark verzweigt. Aus endostalen Arterien zweigen viele Arteriolen rechtwinklig ab und durchziehen die Kortikalis bis in den periostalen Callus. Sie versorgen den größten Teil des periostalen Callus. Hier kommunizieren sie reichlich mit den ebenfalls hyperaktivierten periostalen Arteriolen. Die Arteriolen sind wie gewöhnlich gewunden und stark baumartig verzweigt. Mikroangiographisch läßt sich die Frakturlinie auch an der lateralen Seite durch eine avaskuläre Linie erkennen. Die Arterien aus der A. nutritia reichen bis in die proximale und distale Epiphyse und anastomosieren hier mit den in die Epiphyse eintretenden Gefäße.

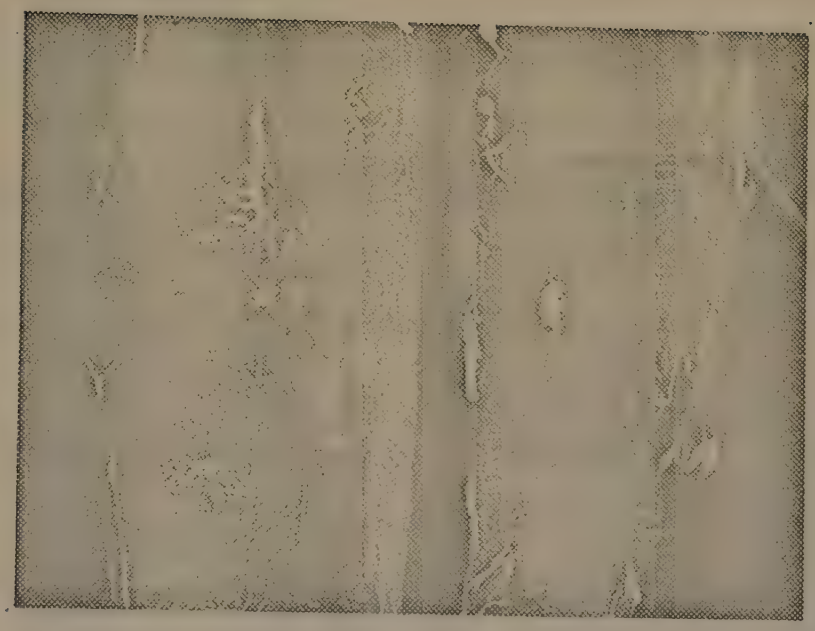


Abb. 11:

3 Wochen nach geschlossener Marknagelung

Mikroangiogramm des Frakturgebietes

Die Fraktur ist mit ziemlich dickem periostalen Callus (links im Bild) geheilt. In der Mitte des Bildes sieht man die Markhöhle mit dem Marknagelbett. Trotz des Marknagels treten Arterien aus der Markhöhle radiär, durch die Kortikalis hindurch bis in den periostalen Callus. Die Gefäße wachsen in den Bruchspalt ein. Von der Periostoberfläche wachsen Arteriolen in den äußeren Teil des periostalen Callus.

5. 6 Wochen nach geschlossener Marknagelung (Abb. 12):

Querfraktur am Ende des proximalen Drittels der Tibia. Sie wurde durch einen verhältnismäßig kräftigen Marknagel stabilisiert. Die Fraktur ist nach 6 Wochen vollkommen ausgeheilt und befindet sich in achsengerechter Stellung. Nur ein geringer ventraler Callus im Frakturbereich ist noch zu sehen. Nach Extraktion des Nagels stellen die Angiogramme die A. nutritia dar, die in normaler Gefäßversorgung den proximalen und distalen Teil der Knochenmarkhöhle versorgt. Die Gefäße sind durch den Nagel an die Wand gedrängt. Im Frakturbereich haben die Arterien, besonders das proximale Gefäßbündel eine S-förmige Abknickung erfahren. Mikroangiographisch sind die periostalen Gefäße nicht dargestellt. Die medullären Arterien zeigen einen Rückgang in ihre Aktivität. Die baumartig verzweigten Arteriolen reichen bis in den Frakturbereich, sind weniger gewunden als bei den vorher beschriebenen Fällen, haben vielmehr fast regulären Verlauf und normales Kaliber. Sie reichen bis in das äußere Drittel der Kortikalis. Wie im vorliegenden Falle reichen die Äste der A. nutritia bis in die proximale und distale Epiphyse. Die mit den Gefäßen der Epiphyse anastomosierenden medullären Aufzweigungen sind großkalibrig.

6. 12 Wochen nach geschlossener Marknagelung

Querfraktur in der Mitte der Tibia, durch einen verhältnismäßig dünnen und langen Nagel stabilisiert. Nach

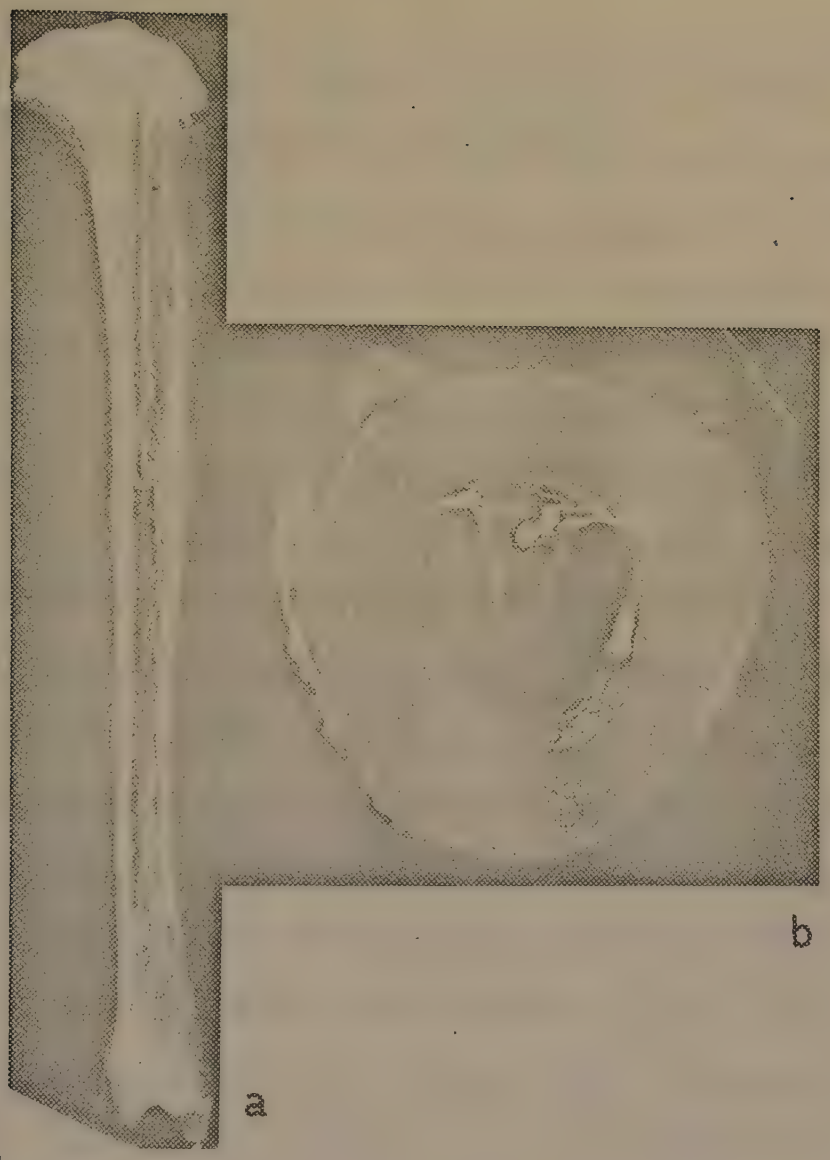


Abb. 12:
6 Wochen nach geschlossener Marknagelung
a) Übersichtsangiogramm
b) Mikroangiogramm eines Querschnitts der Tibiafraktur. Callus ist minimal zu sehen. A. nutritia und ihre Äste sind gut dargestellt. Im Zentrum deutlich das V-förmige Nagelprofil erkennbar. In der Nagelrinne und um den Nagel herum hat sich ein Gefäßnetz entwickelt, von dem aus über radiär angeordnete erweiterte Volkmann'sche Kanäle die gesamte Kortikalis bis zum subperiostalen Raum vaskularisiert wird.
Periostale Gefäße sind vorhanden, geben jedoch kaum Äste zu tieferen Schichten der Kortikalis ab.

12 Wochen war die Fraktur ohne Komplikationen ausgeheilt. Hinweise auf die alte Fraktur sind fast nicht zu erkennen. Nach Nagelextraktion läßt sich eine zarte A. nutritia darstellen, die sich von einer normalen Arterie kaum unterscheidet. Lediglich ein größerer Bogen des deszendierenden Astes in dem Bereich der ehemaligen Frakturzone gibt einen gewissen Hinweis auf die Verletzung. Eine Gefäßwachstumsaktivität ist nicht mehr vorhanden.

7. 24 Wochen nach geschlossener Marknagelung.

Die 24 Wochen alte Fraktur paßt sich deshalb in die vorher beschriebene Versuchsreihe nicht ein, weil eine Osteomyelitis auftrat. Primär handelt es sich um eine Querfraktur am Ende des proximalen Drittels der Tibia. Sie wurde durch einen ziemlich dicken Nagel stabilisiert. In der 6. Woche entstand eine Fistel an der knienahen Operationswunde. Der Knochen zeigt insgesamt unregelmäßige Entkalkungszonen. Die Kortikalis ist dünn geworden, die Kortikalis-Markgrenze ist verwischt. Nach Extraktion des kräftigen Nagels läßt sich ein regelrecht in die Kortikalis eintretender Stamm der A. nutritia erkennen, sie läßt sich aber in der Medullar weder cranialwärts noch distalwärts verfolgen. Man sieht lediglich Fragmente von Gefäßen, die sowohl aus dem Periost als auch aus dem Knochenmark stammen. Die Arteriolen sind im gesamten Knochen vermehrt, zeigen aber keine Hyperaktivität in ihrem Wachstum. Von der Kniepiphyse her bohren sich dünne geradlinige Arteriolen in den Tibiakopf ein und versuchen entlang dem Nagel sich auszubreiten.

IV. DIE KNOCHENBRUCHHEILUNG DER DIAPHYSE DES RÖHRENKNOCHENS NACH OFFENER MARKNAGELUNG

1. Eine Woche nach offener Marknagelung:

Kurzer Schrägbruch in Schaftmitte, durch einen etwas zu kurzen Marknagel versorgt. An der lateralen Seite ist die Fraktur eingestaucht, medial ist ein 4 mm breiter Defekt. Der descendierende Ast der A. nutritia endet im Frakturbereich. Im distalen Knochenfragment werden jedoch Arterien dargestellt, deren Herkunft nur mit der mikroangiographischen Methode zu erklären ist: In der distalen Epiphyse ist das Lumen der Arterien erheblich erweitert und die Arterien sind gewunden. Die Füllung der medullären Gefäße im distalen Fragment erfolgt offensichtlich rückläufig aus der Epiphyse.

2. 1o Tage nach offener Marknagelung:

Trümmerbruch in der Mitte der Tibia, durch einen kräftigen Marknagel in guter Stellung fixiert. Ein Hämatom hat das Periost von der Knochenoberfläche abgehoben. Um den Trümmerbruch wächst unverkalkter Callus. Der Bruch ist jedoch noch nicht stabilisiert. Bei der Nagelextraktion fällt der Bruch fast auseinander. Die A. nutritia wird nicht dargestellt. Trotzdem sind die medullären Arterien proximal und distal der Fraktur zu sehen. Sie werden offenbar rückläufig durch Anastomosen mit den Gefäßen der proximalen und distalen Epiphyse gefüllt. Periost und Endost

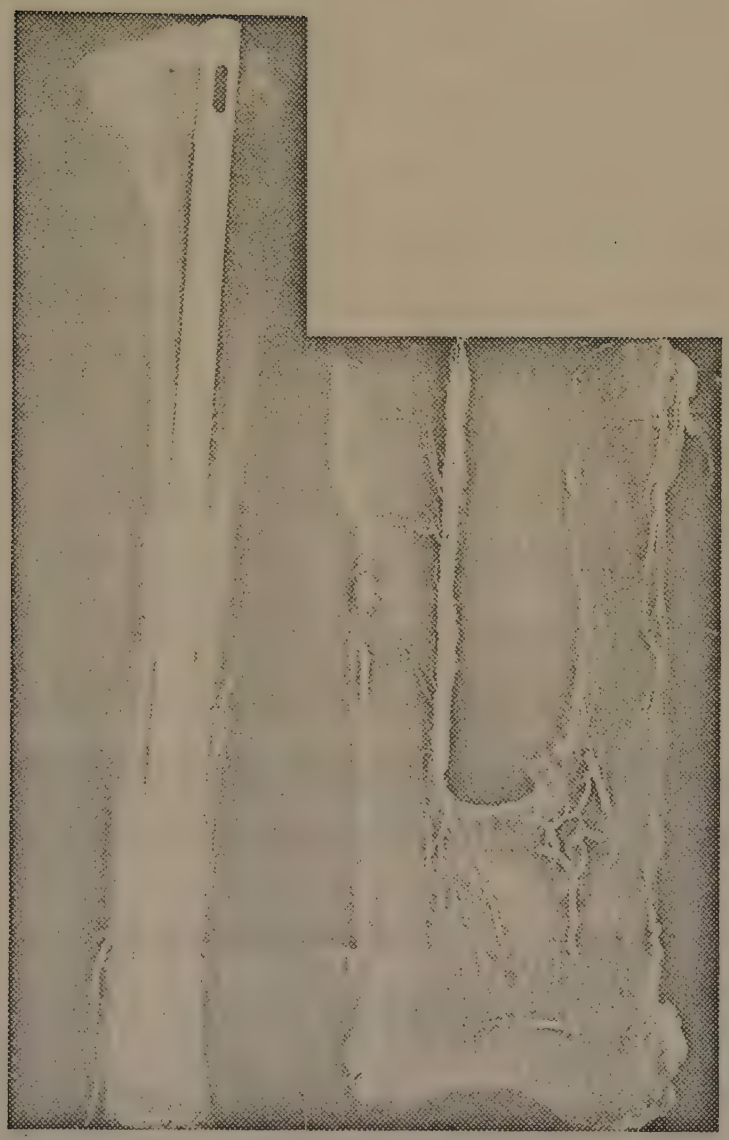
sind hypervaskularisiert, besonders im Frakturbereich. Von Periost und Endost wachsen zahlreiche Arteriolen zwischen die Knochenfragmente.

3. 2 Wochen nach offener Marknagelung:

Kurzer Schrägbruch, durch einen ziemlich dicken Nagel stabilisiert. Ein dicker unverkalkter Callus ist um das ganze proximale Fragment und über die Fraktur hinausgewachsen. Die Fraktur wird dadurch stabilisiert. Die A. nutritia und ihre nach cranial strebenden Äste lassen sich verfolgen. Sie sind durch den dicken Marknagel an die Seite oder in die Rinne des V-förmigen Nagels gedrängt. Nach distal endet der deszendierende Ast im Frakturbereich. Trotzdem sind wie im vorherigen Fall zahlreiche Gefäße um den Marknagel sichtbar. Im periostalen Callus überbrücken zahlreiche, feinste, stark gewundene Gefäße den Frakturbereich. Die periostalen und endostalen Arteriolen sind hyperaktiviert.

4. 3 Wochen nach offener Marknagelung (Abb. 13):

Querfraktur durch einen langen Marknagel versorgt, die Fraktur wurde durch den Nagel jedoch nicht ausreichend stabilisiert. Infolgedessen ist die Fraktur 3 Wochen nach der Operation noch nicht fest. Röntgenologisch ist ein kräftiger, verkalkter periostaler Callus sichtbar. In der Übersichtsangiographie ist die A. nutritia und ihre Äste bis in den Frakturbereich erkennbar. Die aszen-



a b

Abb. 13:
3 Wochen nach offener Marknagelung
a) Übersichtsangiogramm
b) Mikroangiogramm des distalen Drittels
Die Fraktur war instabil. Der distale Teil hat gewackelt. Man sieht dicken mächtigen periostalen Callus und eine große Markhöhle. Von dem endostalen Gefäßsaum wachsen Gefäße bis subperiostal.

dierenden Arterien verlaufen in Nagelrichtung. Die periostalen Arterien sind erweitert, geschlängelt und stark verzweigt. Von den längs des Knochens verlaufenden Arterien zweigen rechtwinklig zahlreiche Arteriolen in den dicken Callus und zum Teil auch in die äußere Schicht der Kortikalis ab. Im cranialen Fragment sind die medullären Gefäße stark hyperaktiviert. Im distalen Fragment ist das Bild anders. Der Marknagel hat den größten Teil des Knochenmarks zerstört. Nur ein dünner, endostaler Gefäßsaum mit zahlreichen zarten Gefäßen ist an der Innenschicht der Kortikalis zu sehen, stellenweise fehlen diese Gefäße jedoch (Abb. 13b). In den Arealen der Kortikalis, die keine endostalen Arteriolen besitzen, ist nur der äußere Teil der Kortikalis mit Blut aus dem Periost versorgt. Die epiphysären Gefäße sind ebenfalls erweitert.

5. 6 Wochen nach offener Marknagelung:

Querbruch in Schaftmitte, durch einen passenden Marknagel fixiert. Nach 6 Wochen zeigen die Röntgenbilder einen dünnen verkalkten spindelförmigen Callus um den konsolidierten Bruch. Die Angiogramme lassen eine regelrecht verlaufende A. nutritia sowohl nach proximal als auch nach distal erkennen. Der deszendierende Ast der Arterie läuft leicht bogenförmig über die konsolidierte Fraktur hinweg. Die Arteriolen zeigen sowohl im ehemaligen Frakturbereich als auch im übrigen Knochen einen starken Rückgang in ihre Wachstumsaktivität. Sie sind wohl vermehrt aber nicht mehr geschlängelt.

6. 17 Wochen nach offener Marknagelung:

Querbruch am Übergang vom mittleren zum distalen Drittel der Tibia. Bei der Marknagelung ist eine starke Einstauchung entstanden. Die Röntgenbilder der 17 Wochen alten Fraktur zeigen einen Rückgang des Callus. Die hypertrophierte A. nutritia tritt regelrecht in den Knochen ein und verteilt sich normal nach proximal und distal. In Höhe der Fraktur ist die Arterie unterbrochen, aus dem Stumpf wachsen noch mehrere Äste nach distal über die Fraktur hinweg aus. Die Arteriolen des Periostes und Endostes verlaufen geradlinig und nicht mehr so stark verzweigt, ihre Aktivität ist rückläufig.

V. DIE KNOCHENBRUCHHEILUNG DER DIAPHYSE LANGER RÖHRENKNOCHEN NACH DRUCKPLATTEN-OSTEOSYNTHESE

An 7 Hunden wurden geschlossene Tibiafrakturen in Schaftmitte durch Druckplatten-Osteosynthese stabilisiert. Die Osteosynthese wurde in der, in der Klinik üblichen Weise, durchgeführt. Die Tiere wurden nach 1 Woche, nach 1o Tagen, nach 2, 3, 6, 12 und 17 Wochen getötet.

Befunde:

1. Das Frakturverhalten eine Woche nach Druckplatten-Osteosynthese:

Querfraktur der Tibiamitte, mit einer 4-Lochhalbrohrplatte versorgt. Platte und Operationsnaht lagen an der ventromedialen Seite der Tibia. Nach wenigen Tagen ent-

stand eine Wunddehiszenz. Am 7. Tag war die Operationswunde so weit offen, daß ein großer Teil der Platte freilag. Der Hund wurde getötet. Die Röntgenbilder zeigen keinen Callus. Angiographisch ist die A. nutritia und ihre aufsteigenden Äste dargestellt. Der distale Ast verläuft nur bis zur Frakturlinie. Vom Bruchbereich ab bis zum Ende der Platte werden keine medullären Arterien dargestellt. Auch mikroangiographisch sind keine Arteriolen erkennbar. Erst distal der Platte lassen sich wieder Gefäße erkennen. Die Arterien und Arteriolen zeigen eine beginnende Wachstumshyperaktivität. Im proximalen und distalen Drittel sieht man Austritt von Kontrastmitteln aus den Gefäßen.

2. Das Frakturverhalten 1o Tage nach Druckplatten-Osteosynthese:

Querfraktur in Schaftmitte, durch eine 3-Lochhalbrohrplatte stabilisiert. 1o Tage nach der Operation ist röntgenologisch kein Callus sichtbar, wohl aber ist bei der Präparation ein dünner unverkalkter periostaler Callus zu sehen. Die Fraktur ist noch nicht stabilisiert. Bei dem Versuch die Platte zu entfernen fällt der Bruch auseinander. Im Angiogramm lassen sich die Gefäße im proximalen Fragment bis zur 2. Schraube verfolgen, sie erreichen jedoch die Bruchlinie nicht. Es ist eindeutig zu sehen, daß eine Unterbrechung der Gefäße durch Schraubenwirkung entstand. Trotzdem sind medulläre Gefäße dargestellt, die von epiphysären Arterien gespeist werden.

Von der letzten Schraube ab nach distal wird das Markraum gut mit Blut versorgt. Zwischen der 2. und 3. Schraube befindet sich jedoch ein gefäßloser Knochenabschnitt. Das Markgewebe ist nekrotisch, zerfließend. Das intakte Periost zeigt leichte wachstumshyperaktive Arterien und Arteriolen ohne daß von hier aus wesentliche Gefäße in die Tiefe, also in die Kortikalis eindringen. In dem Bereich, wo der Markraum keine Gefäße besitzt, bleibt die gesamte Kortikalis gefäßlos.

3. Das Frakturverhalten 14 Tage nach Plattenosteosynthese (Abb. 14):

Querfraktur in der Mitte der Tibia, durch 5-Lochhalbrohrplatte versorgt. 14 Tage nach der Operation ist die Frakturlinie noch sichtbar. Um den Knochen hat sich ein dünner fibröser Callus gebildet. Im Angiogramm lassen sich von der A. nutritia der aufsteigende und absteigende Ast gut verfolgen. Die einzelnen Äste verlaufen bogenförmig um die Schrauben. Die medullären Arteriolen versorgen die inneren Zweidrittel der Kortikalis. Unter der Platte wird die gesamte Kortikalis von medullären Arteriolen durchzogen. Zwischen der Platte und der Kortikalis ist ein dünner Gefäßsaum zu sehen. Die periostalen Gefäße sind nur leicht vermehrt.

4. Das Frakturverhalten 3 Wochen nach Druckplatten-Osteosynthese:

Tibiafraktur eines kleinen Hundes in Schaftmitte, durch

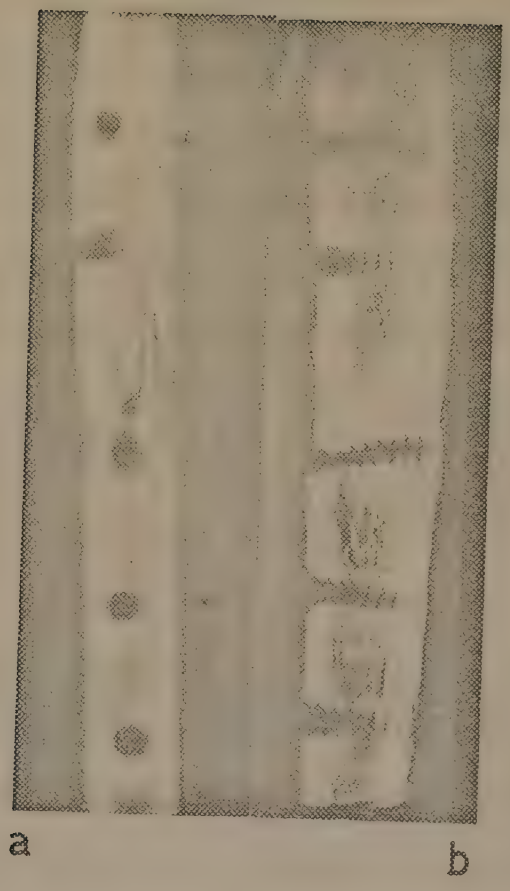


Abb. 14:

14 Tage nach Druckplatten-Osteosynthese

a) Angiographie

b) Mikroangiographie

Die A. nutritia und ihre proximalen und distalen Äste sind dargestellt. Die Arterien wachsen um die Schrauben. Diese Gefäße waren durch die Schrauben durchtrennt und innerhalb von 14 Tagen nachgewachsen. Sie haben ihre alten Wege wieder gefunden. Vom Knochenmark her wachsen Gefäße bis zur Platte.

eine 5-Lochhalbrohrplatte mit 4 Schrauben stabilisiert. Intra-operativ entstanden erhebliche Schwierigkeiten, eine Schraube mußte wieder entfernt werden, da sie durch mehrmalige Bohrungen keinen Halt fand. Nach 3 Wochen hatte sich ein mächtiger, teils schon verkalkter Callus um den gesamten Knochen gebildet. Ein unverkalkter Callus bedeckt auch die Platte. Der Bruchspalt ist röntgenologisch noch sichtbar. Nach Entfernung der Platte erscheint der Bruch jedoch stabil. Angiographisch läßt sich die A. nutritia ganz genau bis zu der Stelle der mehrmaligen Bohrungen verfolgen, dann folgt eine avaskuläre Zone. Die Mikroangiographie zeigt im proximalen Gebiet des Markraumes eine starke Wachstums-Hyperaktivität der Arteriolen, während der Frakturbereich völlig gefäßlos bleibt. Der mächtige periostale Callus der die gesamte Diaphyse und die Platte bedeckt ist stark vaskularisiert, vermag jedoch die Kortikalis im Frakturbereich nicht mit Blut zu versorgen. An der Plattengrenze verlaufen die Gefäße rechtwinklig zur Platte. Im Bereich der proximalen Metaphyse, wo die medullären Gefäße noch intakt sind, sind die hypertrophierten periostalen und endostalen Gefäße in der Kortikalis sehr schwer voneinander zu unterscheiden.

5. Das Frakturverhalten 6 Wochen nach Druckplatten-Osteosynthese:

Querbruch am Übergang vom proximalen zum mittleren Drittel der Tibia. Der Bruch wurde durch eine 4-Lochhalbrohrplatte versorgt. Nach 6 Wochen ist die Fraktur mit einem minimalen

periostalen Callus eindeutig konsolidiert. Der Bruchspalt ist nicht mehr zu sehen. Angiographisch lassen sich aszendierende und deszendierende Äste der A. nutritia darstellen. Sie weichen um die Schrauben herum aus. Ihr Verlauf ist als Kennzeichen dafür zu werten, daß sie bei den Plattenversorgungen durch die Bohrungen unterbrochen wurden, nach 6 Wochen jedoch vollständig wiederhergestellt sind. Die Arteriolen zeigen einen starken Rückgang der Wachstumshyperaktivität. Man erkennt ein normales Bild der Vaskularisation.

6. Das Frakturverhalten 12 Wochen nach Druckplatten-Osteosynthese (Abb. 15):

Querfraktur der Tibia durch eine 4-Lochhalbrohrplatte stabilisiert. 12 Wochen nach der Behandlung ist ein mächtiger verkalkter Callus um den Knochen und die Platte gewachsen. Die Platte ist fest eingemauert. Die Fraktur ist konsolidiert und der Bruchspalt nicht mehr zu sehen. Die A. nutritia und ihr aszendierender Ast sind intakt. Der deszendierende Ast endigt vor der dritten Schraube. Von distal her sind Arterien bis zu der eben beschriebenen Schraube gewachsen. Die medullären Arterien sind vermehrt aber sie sind nicht mehr so stark hyperaktiviert. Sie befinden sich in der Rückbildungsphase. Unter der Platte ist die Kortikalis verdünnt. Sie wird hier ausschließlich von medullären Gefäßen versorgt. Zwischen der Kortikalis und der Platte liegt ein dicker Arteriolensaum. Der periostale Callus ist stark vaskularisiert. Die Gefäße sind unregelmäßig aber nicht so stark verzweigt (Abb. 15).

Abb. 15:

12 Wochen nach Druckplatten-Osteosynthese

Mikroangiogramm

Man sieht vermehrte medulläre Gefäße. Sie reichen bis unter die Platte wo sie einen Gefäßsaum bilden. Die Arteriolen reichen bis in die Schraubenrinnen. Unter der Platte ist die Kortikalis dünn geworden.

7. Das Frakturverhalten 17 Wochen nach Druckplatten-Osteosynthese (Abb. 16):

Querfraktur der Schaftmitte durch eine 4-Lochhalbrohrplatte stabilisiert. 17 Wochen nach der Operation sieht man röntgenologisch noch einen dicken verkalkten Callus über der Platte. Die Platte ist fest ummauert (Abb. 16). Die Fraktur ist klinisch und röntgenologisch geheilt. Wie im vorigen Versuch ist die Kortikalis unter der Platte verschmälert. Die A. nutritia tritt regelrecht in das Knochenmark ein und ist stark verdickt. Ihre aufsteigenden und absteigenden Äste sind ebenfalls verdickt und verlaufen spiralig. Sie weichen bogenförmig den Schrauben aus. Zur Platte hin verlaufen zahlreiche Arteriolen, die die gesamte Kortikalis durchdringen bis zu der unmittelbar der Platte anliegenden Schicht. An der Plattenunterfläche bilden die Arteriolen einen zusammenhängenden Gefäßsaum. Der periostale Callus über der Platte ist durch unregelmäßige Gefäße stark vaskularisiert. Die übrige Knochenoberfläche wird durch eine dünne Callusdecke bedeckt. Der Callus ist hier ebenfalls gut vaskularisiert, die Kortikalis wird jedoch fast ausschließlich durch Arteriolen aus dem medullären Raum versorgt.

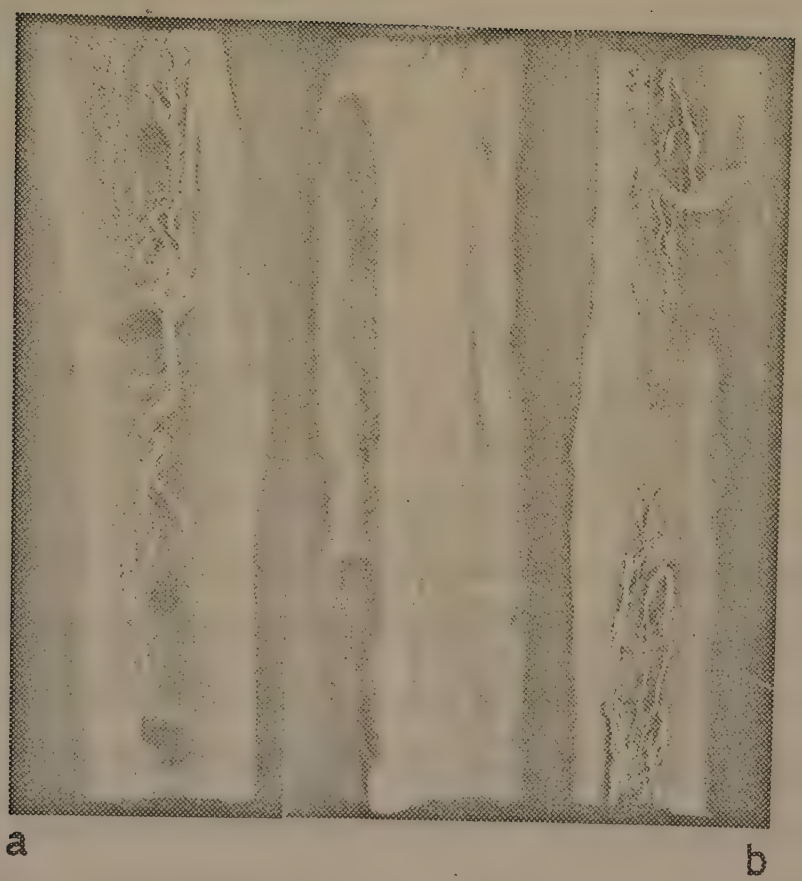


Abb. 16:

17 Wochen nach Druckplatten-Osteosynthese
a) Angiogramme
b) Mikroangiogramme
Die A. nutritia und ihre Äste sind dargestellt. Sie verlaufen um die Schrauben herum. Über die Platte (links im Bild 16a) ist der Callus gewachsen (-). Unter der Platte ist die Kortikalis dünn geworden. Aus den medullären Gefäßen reichen Gefäße bis unter die Platte.

D) DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG

Die vorliegenden experimentellen Untersuchungen basieren zum wesentlichen Teil auf Angio- und Mikroangiographien der Hundetibia. Zunächst wurde der normale Arterien- und Arteriolenverlauf der Tibia untersucht und beschrieben. Das scheint uns im Hinblick auf pathologische Veränderungen des verletzten Knochens und eventuelle Kompensationsmechanismen zwischen den verschiedenen Blutversorgungssystemen sehr wesentlich zu sein. Die Untersuchungen der physiologischen Gefäßversorgung zeigen ganz deutlich die dominierende Funktion des medullären Gefäßsystems, das neben der Versorgung des Markraumes die Durchblutung von Zweidrittel bis Dreiviertel der Kortikalis übernimmt. Das äußere Viertel bis Drittel scheint von den Gefäßen des Periostes versorgt zu werden. In den Metaphysen kommunizieren die Aufzweigungen der A. nutritia mit mehreren in den Knochen eintretenden gelenknahen Arterien. Eine begleitende A. nutritia, die von vielen Autoren (Morgan, Brookes und Harrison, De Marneffe, Göthmann) bei Kaninchen beschrieben wurde, konnte beim Hund nicht beobachtet werden.

Das Ausmaß der Gefäßzerstörung bei Knochenbrüchen hängt von der Art der Fraktur und von der Ausdehnung der im Frakturbereich befindlichen Hämatome ab. Bei Frakturen ohne wesentliche Dislokation sind Gefäßzerstörungen zuweilen gering. Die A. nutritia bleibt in etwa 50 % der

nicht verschobenen Brüche erhalten und ist dann im Angiogramm voll darstellbar. Bei Seitverschiebung der Fraktur um Kortikalisbreite und mehr wird die A. nutritia durchtrennt und die Hämatome werden großflächiger als bei den nicht verschobenen Frakturen. Der absteigende durchtrennte Ast der A. nutritia wird jedoch oft, trotz der Unterbrechung im Hauptstamm, mit Kontrastmittel gefüllt. Die Durchströmung der peripheren Aufzweigungen wird offensichtlich über Anastomosen aus den distalen epiphyseren Gefäßen aufrechterhalten.

Das Hämatom zeigt sich in den Mikroangiogrammen als avaskuläre Zone. Das medulläre Hämatom blockiert die Gefäßausbreitung und hemmt daher das Frühwachstum der Arteriolen über den Bruchspalt hinweg. Bei den Knochenbrüchen mit geringflächigen Hämatomen und guter Stabilisierung überbrücken die Arteriolen den Bruchspalt schon in den ersten 7 Tagen, die Kontinuität der großen Gefäße wird zwischen dem 1o. und 14. Tag wieder hergestellt. Ist die Fraktur instabil, dann bleiben die Gefäße unterbrochen. In den Frakturspalt wächst ein fibrocartilaginärer Callus ein, der sich im Mikroangiogramm gefäßlos darstellt und offenbar durch Diffusion ernährt wird. Er stabilisiert zunächst in einem gewissen Maße die Fraktur. Später wachsen die Arteriolen in den fibro-cartilaginären Callus ein und bauen ihn langsam ab. Sie treten vermehrt spiralförmig und stark baumartig verzweigt auf. Es lassen sich gelegentlich Anastomosen zwischen periostalen und endostalen Arteriolen nachweisen, für die

Versorgung des endostalen Callus sind jedoch überwiegend die medullären Arterien verantwortlich. Mit der Wachstumshyperaktivität der Gefäße nimmt gleichzeitig der Callus an Umfang zu.

Der endostale und periostale Callus beginnt im Allgemeinen gleichzeitig und mit gleicher Entwicklungsgeschwindigkeit zu wachsen. Periostaler Callus entwickelt sich vorwiegend an der dorsalen und lateralen Seite der Tibia. Die Muskulatur mit ihrer eigenen starken Durchblutung hat sicherlich einen günstigen Einfluß auf das Calluswachstum.

Bei den mit Gipsverbänden behandelten Hunden wiesen alle Frakturen der Tibia mehr oder weniger einen offenen Winkel nach dorsal-lateral zwischen 2 und 1o^{o} auf. Die Winkelbildung ist ein Zeichen für die nicht ausreichende Stabilisierung der Fraktur durch Gipsverbände bei Tieren. Die Gipsverbände mußten mehrmals gewechselt werden, da sie angebissen wurden und die Hunde belasteten das verletzte Bein zu früh. Der daraus resultierenden Instabilität entspricht eine verzögerte Wiederherstellung eines kompletten medullären Gefäßsystems. Nach 12 Wochen wie nach 2o Wochen ist jedoch ein völlig wiederhergestelltes medulläres Gefäßsystem vorhanden, das den Knochen wie auf der gesunden Seite in physiologischer Größenordnung mit Blut versorgt, während das periostale Gefäßsystem die ihm eigene untergeordnete Bedeutung in der Gesamtversorgung des Knochens einnimmt.

Die mit geschlossener Marknagelung behandelten Hunde zeigten bessere Ergebnisse als die mit Gips behandelten. Der periostale Callus war geringer und wurde auch schneller resorbiert. Die Wachstumsaktivität der Gefäße war entsprechend gering und erreichte das Maximum verhältnismäßig früh.

Bei der offenen Marknagelung waren die medullären Gefäße an der Bruchstelle immer durchtrennt. Die Hämatome waren größer und die periostale Zerstörung viel ausgedehnter. Der von uns verwandte V-förmige Marknagel ist so beschaffen, daß ein Raum zwischen ihm und der Kortikalis für den Gefäßverlauf ausgespart wird. Die Gefäße ließen sich dadurch im Mikroangiogramm gut darstellen. Sie werden durch den Marknagel zur Seite gedrängt und zum Teil zerstört. Die medullären Gefäße wachsen jedoch unter der Stabilisierung schnell nach, so daß bereits nach 14 Tagen ein normales und kontinuierliches medulläres Gefäßsystem zu beobachten war. Die medullären Gefäße übernehmen unter diesen Umständen sehr bald wieder die Versorgung der Kortikalis.

Ein Tier war besonders aufschlußreich:
Die Nagelung war instabil, der Nagel hatte im Knochenmark gewissen Spielraum, dadurch wurde das Knochenmark und seine Gefäße zerstört. Es entstand ein riesiger periostaler Callus. Der stark vaskularisierte periostale Callus lag der Kortikalis auf, aus ihm drangen jedoch keine Gefäße

in die Kortikalis ein, sie blieb vielmehr nach Zerstörung des medullären Systems avaskulär.

Diese Befunde zeigen, daß durch einen stabilen Nagel die Gefäße nicht zerstört werden, daß vielmehr unter der stabilen Markraumosteosynthese sich das medulläre Gefäßsystem rasch wieder aufbaut und die ursprüngliche Versorgung des Knochens in dem ihm zugedachten Umfang wieder übernimmt. Diese Befunde widersprechen den Angaben von Trueta, Laing und Küntscher, die eine permanente Zerstörung der medullären Gefäße durch den Nagel annehmen. Die Wachstumsaktivität der periostalen und endostalen Gefäße ist auch bei der Marknagelung gleichgroß. Bei Tieren mit stärkerer Zerstörung der Äste der A. nutritia wird die Markdurchblutung durch die epiphysären Gefäße unterstützt. Man sieht vermehrt Anastomosen zwischen epiphysären Gefäßen und Ästen der A. nutritia, deren Querschnitte insgesamt vergrößert sind. Die Wachstumsaktivität der Gefäße hat ihren höchsten Punkt in den ersten 3 Wochen. Dann setzt ein Rückgang der Aktivität ein. Bei offener Marknagelung war generell eine leichte Verzögerung in der Rückbildungsphase der Gefäße und des Callus zu beobachten. Für die Rückbildungsphase ist die Stabilität der Fraktur entscheidend. Bei stabiler Fraktur erreichen die Gefäße schneller wieder ihre physiologische Weite und Länge. Dabei kann die Frakturlinie röntgenologisch noch zu sehen sein. Bei ungestörter Knochenbruchheilung ist schon in der 6. Woche ein starker

Rückgang der Gefäßaktivität zu beobachten. Nach der 12. Woche der Knochenbruchbehandlung ist die Gefäßaktivität fast verschwunden.

Angio- und Mikroangiographie bei Druckplatten-Osteosynthesen sind von besonderem Interesse, da in der Literatur und in Diskussionen immer wieder auf die Bedeutung des Periostes für die Bruchheilung hingewiesen wird. Durch Freilegen des Knochens und Anbringen der Druckplatte soll das Periost weigehend zerstört und damit die Bruchheilung verzögert werden.

Die Angio- und Mikroangiogramme bei nach den allgemein gültigen Regeln durchgeführter Druckplatten-Osteosynthese zeigen, daß ein Knochenbruch durch Druckplatte zuverlässig stabilisiert wird. Die Platte erhält die Funktion eines um die Fraktur gewachsenen periostalen Callus. Trotz Freilegung und Anbringung der Platte an der Knochenoberfläche entwickelt sich in den ersten 3 Wochen dort, wo der Knochen nicht von der Platte bedeckt ist, gut vaskularisierter, periostaler Callus verschiedener Dicke, der nach 3 Wochen sich zurückzubilden beginnt. Die Rückbildung des Callus korrespondiert mit dem Rückgang der Gefäßaktivität im Frakturgebiet.

Von besonderem Interesse ist dabei das medulläre Gefäßsystem. Die fixierenden Schrauben müssen zwangsläufig gewisse Verletzungen des medullären Gefäßsystems unabhängig von den durch Frakturmechanismus bedingten Verletzungen

bewirken. Trotzdem läßt sich 14 Tage nach Platten-Osteosynthese eine vollständige Wiederherstellung der medullären Arterien erkennen. Die einzelnen Äste laufen bogenförmig um die Schrauben herum - ein Beweis, daß die Gefäße durch die Bohrer durchtrennt worden waren - innerhalb 14 Tagen jedoch wieder Anschluß an das normale Gefäßsystem fanden. Bei 2 kleinen Hunden mit einem niedrigen Knochenquerschnitt war die Zerstörung der medullären Gefäße durch die im Verhältnis zum Knochenquerschnitt zu dicken Schrauben so ausgedehnt, daß noch bis zum 7. bzw. 23.Tage ausgedehnte avaskuläre Zonen im Bereich der Fraktur vorhanden waren. In beiden Fällen war periostale Vaskularisation vorhanden, die Gefäße blieben jedoch auf die Oberfläche beschränkt, ohne daß sie zur Revaskularisation der Kortikalis beigetragen hätten. Bei den übrigen Tieren baute sich das medulläre Gefäßsystem voll auf und übernahm- im Mikroangiogramm sehr eindrucksvoll zu beobachten - die Ernährung der Kortikalis vollständig. Über erweiterte Volkmann'sche Kanäle, die mit den Havar'schen Kanälen anastomosieren, erreichen Arterien und Arteriolen aus dem Knochenmark die äußersten Zonen der Kortikalis, um auch die unmittelbar unter der Platte gelegenen Kortikalisschichten zu versorgen. Ebenso werden die Knochenleisten zwischen den einzelnen Schraubenwindungen reichlich vaskularisiert.

Nach Verplattung wie auch nach Nagelung ist die biologische Tendenz unverkennbar, das physiologischerweise dominierende Gefäßsystem des Markraumes wieder herzustellen. Auch nach

Ruhigstellung durch Gipsverband kommt es, wenn auch etwas verzögert, zur Wiederherstellung des medullären Gefäßsystems, sofern die Ruhigstellung ausreichend und eine Zeit von wenigstens 12 Wochen zur Verfügung stand. Unsere Ergebnisse unterstreichen die Aussagen von Trueta und Cavadias, Brookes und Harrison, Tilling, Brookes, Morgan und Göthmann, die am unverletzten Knochen dem medullären Gefäßsystem die größte Bedeutung für die Ernährung zuerkennen.

E) Zusammenfassung

Unter Zusammenfassung und kritischer Beurteilung unserer Beobachtungen dürfen wir folgende Feststellung treffen:

1. Die physiologische Blutversorgung der Tibia des Hundes erfolgt über 3 Systeme: medulläres, epimetaphysäres und periostales Gefäßsystem.

2. Unter den 3 Versorgungssystemen dominiert das medulläre System (A. nutritia), das für die Versorgung von mehr als 7o % der Tibia verantwortlich ist.

3. Frakturen des Tibiaschaftes führen nur dann zu Zerreißungen des medullären Gefäßstammes, wenn die Dislokation mehr als Kortikalisbreite beträgt; bei nicht verschobenen oder wenig gewinkelten Frakturen bleibt die A. nutritia erhalten.

4. Die Reaktion des Gefäßsystems auf eine Fraktur besteht in Erweiterung des Gefäßquerschnittes und korkenzieherartiger Schlängelung bis in den Bereich der Arteriolen

und Capillaren. Das Gefäßwachstum hält bis zur 3. Woche an um sich nach Stabilisierung und Frakturheilung wieder zurückzubilden.

5. Unter stabiler Osteosynthese baut sich ein medulläres Gefäßsystem sowohl nach Verplattung wie auch nach Marknagelung vollständig wieder auf und übernimmt rasch die ihm physiologischerweise zugewiesene Funktion.

6. Wird das Periost mit seinen Gefäßen zerstört, z.B. im Bereich einer Platte, übernimmt das medulläre Gefäßsystem die Ernährung der gesamten Kortikalis.

7. Wird das medulläre Gefäßsystem zerstört und aus bestimmten Gründen wie Instabilität, Infektion usw. nicht wieder hergestellt, bleibt die Kortikalis avaskulär. Aus dem aufgelagerten, stark vaskularisierten periostalen Callus dringen keine Gefäße in die Kortikalis ein. Eine Stromumkehr, wie von Rhinelander beschrieben, tritt nicht ein.

Literaturverzeichnis

1. ANDERSON, L.D. — Compression plate fixation and the effect of different types of internal fixation on fracture healing. J. Bone Jt. Surg 47 A 191-2o8 (1965)

2. AXHAUSEN, G. und BERGMANN, E. — Die Ernährungsunterbrechung am Knochen. In Handbuch der speziellen pathologischen Anatomie und Histologie (ed.F. Henke und O. Lubarsch) Vol. 9,3 118-2o3 J.Springer,Berlin (1937)

3. BRAGDON, J.H., FOSTER, L., SOSMANN, M. — Experimental infarction of bone and marrow. Am. J. Path. 25 7o9-715 (1949)

4. BROOKES, M. and HARRISON, R.G. — The vascularisation of the rabbit femur and tibia-fibula. J. Anat. 91, 61-71 (1957)

5. BROOKES, M. — Sequelae of experimental partial ischaemia in the rabbit. J. Anat., 94 552-561 (196o)

6. BROOKES, M. — The blood supply of bone. In Modern Trens of Orthopaedics. 4. Seience of Fractur (ed. M.P.Clark) Butterworth London (1964)

7. BRÄNEMARK, P.I. — Vital microscopy of bone marrow in rabbit. Scand.J.Clin.Lab.Invest., Suppl.38 (1959)

8. BRÄNEMARK, P.I., BREINE, U., JOHANSON R., ROYLANCE, P.J., RÖCKERT, H., YOFFEY, J.M. — Regeneration of bone marrow. Acta anat. 59, 1-46 (1964)

9. COHEN, J. und HARRIS, W.H. — The three dimensional anatomy of Haversia Systems. J.Bone Jt. Surg 4oA, 419-434 (1958)

1o. CUTHBERTSON, E.N., SIRIS E. and GILFINLLAN, R.S. — The effect of ligation of the canine nutrient artery on intramedullary pressure. J.Bone und Jt.Surg 46A 781-788 (1964)

11. DANIS, R. — Théorie et Practique de l'Ostéo-synthèse. Masson et Cie, Paris (1949) S.296

12. DE MARNEFF, R. — Recherches sur la vascularisation osseuse. Acta Chir.Belg. 7, 47o-7o4 (1951)

13. DE MARNEFF, R. — Les connaissances actuelles de la vascularisation des os et leur incidence sur la pathologie de ce tissu. Revue du rhumatisme et des maladi ostéo-articulaires, 2o, 113-119 (1953)

14. FOSTER, L.N., KELLY, R.P. and WATTS, W.M. — Experimental infarction of bone and bone marrow. J. Bone Jt.Surg 33A 396-4o6 (1951

15. GÖTHMAN, L.
Vascular reactions in experimental fractures.
Microangiographic and radiosotope studies.
Acta chir. Scand.Suppl. 284 (1961)

16. GUSTILO, R.B., NELSON, G.E., HAMEL, A. and MOE, J.H.
The effect of intramedullary nailing on the blood supply of the diaphyses of long bones in mature dogs
J. Bone Jt. Surg. 46A, 136-1363 (1964)

17. HAMMERSEN, F. und SEIDEMANN K.
Ein Beitrag zur Angioarchitektomik der Knochenhaut.
Arch. Orthop. Unf.-Chir. 56, 617-633 (1964)

18. HARRISON, R.G.
Vascularisation of Bone.
J. Bone Jt. Surg. 48B, 85o (1966)

19. JOHNSON, R.W.
A physiological study of the blood supply of the diaphysis.
J. Bone Jt. Surg 9, 153-184 (1927)

2o. KELLY, J.P.
Anatomy, physiology and pathology of the blood supply of bones.
J.Bone Jt. Surg 5oA, 766-783 (1968)

21. KÜNTSCHER, G.
Die Marknagelung von Knochenbrüchen
Arch. für Klin. Chir. 2oo, 443-455 (194o)

22. KÜNTSCHER, G.
Kallus ohne Knochenbruch
Zentralblatt für Chir. 68, 857-868 (1941)

23. KÜNTSCHER, G.
Der Knochen als Entzündungsmodell
Z.Ges.exp.Med. 13o, 279-288 (1958)

24. KÜNTSCHER, G.
Praxis der Marknagelung
F.K.Schattauer Verlag, Stuttgart (1962)

25. LAING, P.G. — The blood supply of the femoral shaft. An anatomy study. J. Bone Jt. Surg 35 B, 462 (1953)

26. LAING, P.G. — The arterial supply of the adult humerus. J. Bone Jt. Surg 38 A, 1105-1118 (1956)

27. LARSON, R.L., KELLY, P.J. JONES, J.M. and PETERSON, F.A. — Suppression of the periosteal and nutrient blood supply of the femora of dogs. Clin. Orthop. 21, 217-224 (1961)

28. LEXAR, E., KULIGA, P. and TURK, W. — Untersuchung über Knochenarterie mittels Röntgenaufnahmen injizierter Knochen und ihre Bedeutu für einzelne path. Vorgänge am Knochensystem. A. Hirschwald, Berlin (1904)

29. MACNAB, I. — The blood supply of tubular and cancellons bone. J. Bone Jt. Surg 40 A, 1433-1434 (1958)

30. MC AULEY, G.O. — The blood supply of the rat's femur in relation to the repair of cortical defects J. Anat., 92, 655 (1958)

31. MORGAN, J.D. — Blood supply of growing rabbit's tibia. J. Bone Jt. Surg. 41 B, 185-203 (1959)

32. MÜLLER, M.E. ALLGÖWER, M. WILLENEGGER, H. — Manual der Osteosynthese Springer Verlag (1969)

33. MITAL, M. and COHEN, J.
Reperair of experimental bony intramedullary injuries varying in degree.
Surg.Forum, 17, 451-452 (1966)

34. OLERUD, S. DANKWARDT-LILLIESTRÖM, G. LORENZI, G.L.
Treatment of curved transverse osteotomies with an endomedullary comression nail
Europ. Surg. Res I, 172 (1969)

35. PHEMISTER, G.B.
Repair of Bone in the presence of aseptic necrosis resulting from fractures transplantations and vascular obstruction.
J. Bone Jt. Surg., 12, 769-787 (193o)

36. RICHANY, S.F., KRANER, K., ASHBY, J. and MERRILL, T.G.
The role of the diaphyseal medulla in repair and regeneration of the femoral shaft in th adult cat.
J. Bone Jt. Surg., 47A, 1565-1584 (1965)

37. RHINELANDER, F.W., BARAGRY, R.A.
Microangiography in bone healin I Undisplaced fractures.
J. Bone Jt. Surg., 44A, 1273-1298, (1962)

38. RHINELANDER, F.W.
Some aspects of microcirculation of healing bone.
Clin. Orthop. 4o, 12-16 (1965)

39. RHINELANDER, F.W. GRACILLA, R.V., PHILLIPS, R.S., and STEEL, W.M.
Microangiography in bone healin III. Osteotomies with internal fixation
J. Bone Jt. Surg., 49A, 1oo6-1oo7 (1967)

40. RHINELANDER, F.W., PHILLIPS, R.S., STEEL, W.M., and BEER, J.C.
Microangiography in bone healing I Displaced closed fractures.
J. Bone Jt. Surg. 50A, 643-662 (19

41. RHINELANDER, F.W.
Normal microcirculation of diaphys cortex and its respond to fracture
J. Bone Jt. Surg., 50A, 784-800 (1

42. RÖHLICH, K.
Über Beziehungen zwischen der Knochensubstanz und der Blutbildun im Knochenmark.
Z. mikr. anat. Forsch. 49, 425-464 (1941)

43. SCHENK, R. und WILLENEGGER, H.
Zum histologischen Bild der soge- nannten Primaerheilung der Knochen kompakta nach experimentellen Oste tomien am Hund.
Experimentia 19, 593-595 (1963)

44. SCHENK, R. und WILLENEGGER, M.
Zur Histologie der primären Knoche heilung.
Langenbeck Arch. Klin. Chir. 308: 440 (1964)

45. SHIM, S.S., COPP, D.H. and PATTERSON, F.P.
Measurement of the rate and distri bution of the nutrient and ther arterial blood supply in long bone of the rabbit.
J. Bone and Joint Surg. 50B, 178- 183 (1968)

46. SILBERMANN F.S., SOLA C.K. and CABRINI R.L.
A study of the vascular distributi after periosteal stripping of the long bones.
Surg. Gynec. Obst., 125, 1311-1315 (1967)

47. SPALTEHOLZ, K.W. — Über das Durchsichtigmachen von menschlichen und tierischen Präparaten
Zweite Auflage S. Mirzel, Leipzig (1914)

48. GILLING, Gunnar — The Vascular anatomy of long bones.
Acta radiol. Suppl. 61 (1958)

49. TRUETA, G., BARCLAY, A.E., DANIEL, P.M., FRANKLIN, K.G., PRICHARD, M.M.L. — Studies of the renal cirulation.
Oxford: Blackwell Scientific Puplication (1947)

5o. TRUETA G. and HARRISON M.H.M. — The normal vascular enatomy of the femoral head in adult man.
J. Bone and Joint Surg. 35 B, 442 (1953)

51. TRUETA, J. and CAVADIAS, A.X. — Vascular changes caused by the Küntscher type of mailling.
J. Bone and Joint Surg. 37B, 492-5o5 (1955)

52. TRUETA, G. — The role of the vessels in osteogenesis.
J. Bone and Joint Surg. 45B, 4o2 (1963)

53. TRUETA, G. and CAVADIAS, A.X. — A study of the blood supply of the long bones.
S. Surg. Gyne and Obstetries 118, 485-498 (1964)

54. WAGNER, H. — Die Einbettung von Metallschrauben im Knochen und die Heilungsvorgänge des Knochengewebes unter dem Einfluß der stabilen Osteosynthese.
Langenbecks Archiv für Klin. Chir.3o5, 28 (1963)

55. WEISER, C. und ALLGÖWER,M.
Die Beurteilung der Knochenheilung nach stabiler Osteosynthese im Röntgenbild.
Radiol. Chimica 31 297 (1962)

56. WILLENEGGER, H., SCHENK R., STRAUMANN, F., MÜLLER, M.E., ALLGÖWER, M. und KRÜGER,H.
Methodik und vorläufige Ergebnisse experimentelle Untersuchungen über die Heilvorgänge bei stabiler Osteosynthese an Schaftfrakturen.
Langenbecks Arch. Klin. Chir. 3o1 846 (1962)

57. ZUCMAN, J., MAURER, P. and BERBERSON, C.
The effect of antsgrapts of bone an periosteum in recent diaphysia fractures.
J.B. G. Surg. 5o B 4o9-421 (1968

Für die Überlassung des Themas und die freundliche Beratung bei der Arbeit möchte ich an dieser Stelle Herrn Privat-Dozent Dr. Schweiberer herzlich danken.

Gleichzeitig danke ich Herrn Dr. van de Berg aus der Chirurgischen Klinik für seine stets hilfreiche Unterstützung. Auch bin ich Herrn Privat-Dozent Dr. Habauer, Leiter der experimentellen Chirurgie, für seine Hilfe dankbar.

Für die Hilfe bei den angio- und mikroangiographischen Aufnahmen möchte ich mich bei Fräulein Jakob aus der Chirurgischen Klinik sowie bei Fräulein Keller für das Schreiben der Arbeit bedanken.

Ebenso danke ich der Wissenschaftlichen Gesellschaft des Saarlandes für die Finanzierung dieser Arbeit.

L E B E N S L A U F

Ich, Tresfore Leo D a m b e , bin am 3. Januar 1939 als Sohn der Eheleute Leo Dambe und Sofia geb. Dzimame in Dzimame (Malawi - früher Njassaland) geboren.

Von 1947 bis 1956 besuchte ich die Volksschule in Ligowe und Mzedi. Nach 3-jährigem Besuch des Mzedi-Gymnasiums wechselte ich 1958 die Schule und besuchte das Gymnasium in Mzuzu, wo ich im Dezember 196o die Abschlußprüfung bestand.

Im Mai 1961 kam ich nach Köln um dort die deutsche Sprache zu studieren. Nach der Abschlußprüfung wechselte ich über nach Saarbrücken. Hier besuchte ich während eines Jahres das Studien-Kolleg. Danach ließ ich mich in die medizinische Fakultät der Universität des Saarlandes immatrikulieren. Am 8. Dezember 1969 habe ich das medizinische Staatsexamen mit der Note "Gut" abgeschlossen.

Meine Medizinalassistentenzeit verbrachte ich an den Universitätskliniken in Homburg: vom 1.1. - 3o.6.7o war ich Medizinalassistent der Medizinischen Klinik. Seit dem 1.7. war ich als M.A. an der Chirurgischen Universitätsklinik tätig. Die Medizinalassistentenzeit wurde am 31.12.197o abgeschlossen.